

This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

هذه النسخة الإلكترونية (PDF) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (ITU) والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلاً.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.

© International Telecommunication Union

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

AVIS ET RAPPORTS DU CCIR, 1982

(AINSI QUE QUESTIONS, PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉSOLUTIONS, VŒUX ET DÉCISIONS)

XV^{e} ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
GENÈVE, 1982

VOLUME IV — PARTIE 1

SERVICE FIXE PAR SATELLITE

Genève, 1982

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

AVIS ET RAPPORTS DU CCIR, 1982

(AINSI QUE QUESTIONS, PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉSOLUTIONS, VŒUX ET DÉCISIONS)

XV^{e} ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
GENÈVE, 1982

VOLUME IV — PARTIE 1

SERVICE FIXE PAR SATELLITE

Genève, 1982

ISBN 92-61-01412-7

PLAN DES VOLUMES I A XIV
DE LA XV^{e} ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR

(Genève, 1982)

VOLUME I	Utilisation du spectre et contrôle des émissions.
VOLUME II	Recherche spatiale et radioastronomie.
VOLUME III	Service fixe fonctionnant sur des fréquences inférieures à 30 MHz environ.
VOLUME IV-1	Service fixe par satellite.
VOLUME IV/IX-2	Partage des fréquences et coordination entre le service fixe par satellite et les faisceaux hertziens.
VOLUME V	Propagation dans les milieux non ionisés.
VOLUME VI	Propagation dans les milieux ionisés.
VOLUME VII	Fréquences étalon et signaux horaires.
VOLUME VIII	Services mobiles.
VOLUME IX-1	Service fixe utilisant les faisceaux hertziens.
VOLUME X-1	Service de radiodiffusion (sonore).
VOLUME X/XI-2	Service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision).
VOLUME XI-1	Service de radiodiffusion (télévision).
VOLUME XII	Transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision sur une grande distance (CMTT).
VOLUME XIII	Vocabulaire (CMV).
VOLUME XIV-1	Renseignements relatifs à la XV^{e} Assemblée Plénière: Procès-verbaux des séances plénières. Textes administratifs. Structure du CCIR. Listes des textes émis par le CCIR.
VOLUME XIV-2	Index alphabétique des termes techniques contenus dans les Volumes I à XIII.

Sauf indication contraire, les références aux Avis, Rapports, Résolutions, Vœux, Décisions, Questions et Programmes d'études à l'intérieur des textes du CCIR sont celles de l'édition 1982, et seul le numéro principal est mentionné.

© UIT

Imprimé en Suisse

RÉPARTITION DES TEXTES DE LA XV^{e} ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR PARMI LES VOLUMES I A XIV

Les Volumes I à XIV, XV^{e} Assemblée plénière, contiennent tous les textes du CCIR actuellement en vigueur. Ils se substituent à ceux de l'édition de la XIV^{e} Assemblée plénière, Kyoto, 1978.

1. Avis, Rapports, Résolutions, Vœux et Décisions

1.1 *Indications sur la numérotation de ces textes*

Les Avis, Rapports, Résolutions et Vœux sont numérotés dans la série en vigueur depuis la X^{e} Assemblée plénière.

Selon les décisions de la XI^{e} Assemblée plénière, en cas de révision de l'un de ces textes, celui-ci conserve son numéro auquel on ajoute un trait d'union et un chiffre indiquant le nombre de révisions successives. Exemples: Avis 253 pour la première version de l'Avis, Avis 253-1 pour sa première révision, Avis 253-2 pour sa deuxième révision, et ainsi de suite. Cependant, dans le corps même du texte des Rapports et Avis, seul le numéro principal sera mentionné (par exemple, Avis 253) étant entendu que l'on se réfère à la version la plus récente du texte, sauf mention contraire.

Les numéros de ces textes figurent dans les tableaux ci-dessous; le chiffre indiquant le nombre de révisions successives n'a pas été mentionné dans les tableaux. Pour plus de détails sur la numérotation, voir le Volume XIV-1.

1.2 *Avis*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
48, 49	X-1	374-376	VII	485, 486	VII
80	X-1	377-379	I	487-494	VIII
100	I	380-393	IX-1	496	VIII
106	III	395-405	IX-1	497	IX-1
139, 140	X-1	406	IV/IX-2	498, 499	X-1
162	III	407-412	X-1	500, 501	XI-1
182	I	414-416	X-1	502-505	XII
205	X-1	417, 418	XI-1	508	I
214-216	X-1	419	XI-1	509-511	II
218, 219	VIII	422, 423	VIII	513-517	II
239	I	428	VIII	518-520	III
240	III	430, 431	XIII	521-524	IV-1
246	III	433	I	525-530	V
257	VIII	434, 435	VI	531-534	VI
265, 266	XI-1	436	III	535-538	VII
268	IX-1	439	VIII	539-550	VIII
270	IX-1	441	VIII	552-554	VIII
275, 276	IX-1	443	I	555-557	IX-1
283	IX-1	444	IX-1	558	IV-1
290	IX-1	445	I	559-564	X-1
302	IX-1	446	IV-1	565	XI-1
305, 306	IX-1	447	X-1	566	X/XI-2
310, 311	V	450	X-1	567-572	XII
313	VI	452, 453	V	573, 574	XIII
314	II	454-456	III	575	I
326-329	I	457, 458	VII	576-578	II
331, 332	I	460	VII	579, 580	IV-1
335, 336	III	461	XIII	581	V
337	I	463	IX-1	582, 583	VII
338, 339	III	464-466	IV-1	584-591	VIII
341	V	467, 468	X-1	592-596	IX-1
342-349	III	469-472	XI-1	597-599	X-1
352-354	IV-1	473, 474	XII	600	X/XI-2
355-359	IV/IX-2	475, 476	VIII	601, 602	XI-1
362-364	II	478	VIII	603-606	XII
367	II	479	II	607, 608	XIII
368-370	V	480	III		
371-373	VI	481-484	IV-1		

1.3 *Rapports*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
19	III	363, 364	VII	581	VIII
32	X-1	368, 369	I	584, 585	VIII
93	VIII	371, 372	I	587-589	VIII
106, 107	III	374-376	IX-1	599	VIII
109	III	378-380	IX-1	607	IX-1
111	III	382	IV/IX-2	610	IX-1
122	XI-1	383-385	IV-1	612-615	IX-1
137	IX-1	386-388	IV/IX-2	616, 617	X-1
176, 177	III	390, 391	IV-1	619, 620	X-1
179	I	393	IV/IX-2	622	X-1
181	I	395, 396	II	623	XII
183	III	401	X-1	624-626	XI-1
184	I	404, 405	XI-1	628, 629	XI-1
195	III	409	XI-1	630	XI-1
196	I	411, 412	XII	631-634	X/XI-2
197	III	419, 420	I	635-637	XII
200, 201	III	422	I	639	XII
203	III	430-432	VI	642, 643	XII
204-208	IV-1	434-437	III	646-648	XII
209	IV/IX-2	439	VII	651-668	I
212	IV-1	443-445	IX-1	670, 671	I
214	IV-1	448, 449	IV/IX-2	672-685	II
215	X/XI-2	451	IV-1	687, 688	II
222	II	453-455	IV-1	690	II
224	II	456	II	692-697	II
226	II	457, 458	X-1	699, 700	II
227-229	V	461	X-1	701-705	III
236	V	463-465	X-1	706-713	IV-1
238, 239	V	468	X-1	714-724	V
249-251	VI	468	XI-1	725-729	VI
252	VI(1)	469	XI-1	730-732	VII
253-255	VI	472	X-1	735-738	VII
258-260	VI	473	X/XI-2	739-749	VIII
262, 263	VI	476-478	XI-1	751, 752	VIII
265, 266	VI	481-485	XI-1	754	VIII
267	VII	488	XII	758	VIII
270, 271	VII	491	XII	760-775	VIII
272, 273	I	493	XII	778	VIII
275-280	I	496, 497	XII	779-789	IX-1
284-289	IX-1	499-501	VIII	790-793	IV/IX-2
292, 293	X-1	509	VIII	794-800	X-1
294	XI-1	516	X-1	801-806	XI-1
299-304	X-1	518	VII	807-812	X/XI-2
306	XI-1	519-526	I	814	X/XI-2
311-313	XI-1	528	I	815-823	XII
314	XII	530	I	825-842	I
319	VIII	532-534	I	843-854	II
322	VI(1)	535, 536	II	855-865	III
324-326	I	538-541	II	866-875	IV-1
327	III	542	VIII	876, 877	IV/IX-2
329	III	543-546	II	878-885	V
336	V	548	II	886-895	VI
338	V	549-551	III	896-898	VII
340	VI(1)	552-561	IV-1	899-929	VIII
342	VI	562-565	V	930-942	IX-1
345	III	567	V	943-950	X-1
347	III	569	V	951-955	X/XI-2
349	III	571	VI	956-964	XI-1
352-357	III	574, 575	VI	965-970	XII
358	VIII	576-580	VII	971	XIII

(1) Publiés séparément.

1.3.1 *Note au sujet des Rapports*

La mention individuelle «adopté à l'unanimité» a été supprimée pour chaque Rapport. Les Rapports contenus dans ce Volume sond adoptés à l'unanimité sauf dans les cas où des réserves faisant l'objet d'une note de bas de page sont émises.

1.4 *Résolutions*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
4	VI	39	XIV-1	71	I
14	VII	44	I	72, 73	V
15	I	61	XIV-1	74, 75	VI
20	VIII	62	I	76	X-1
23	XIII	63	VI	77	XIV-1
24	XIV-1	64	X-1	78	XIII
26, 27	XIV-1	66	XIII	79-87	XIV-1
33	XIV-1	67-70	XIV-1		

1.5 *Vœux*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	I	41	XII	64	I
11	I	42, 43	VIII	65	XIV-1
13, 14	IX-1	45, 46	VI	66	III
15, 16	X-1	49	VIII	67-69	VI
22, 23	VI	50	IX-1	70-72	VII
26-28	VII	51	X-1	73	VIII
32	I	56	IV-1	74	X-1
35	I	59	X-1	75	XI-1
38	XI-1	60	XI-1	76	XIII
40	XI-1	61-63	XIV-1	77-81	XIV-1

1.6 *Décisions*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	IV-1	28, 29	VII	47-49	VIII
3-5	V	32	VIII	50	V
6	VI	33	XI-1	51	X/XI-2
9-11	VI	36	VI	52	X-1
18	XII	39-40	X-1	53, 54	I
19	XIII	41, 42	XI-1	55	IX-1
21	VI	43, 44	X/XI-2	56	I
27	I	45	III		

1.6.1 *Note au sujet des Décisions*

Etant donné que les Décisions ont été adoptées par les Commissions d'études, on a utilisé l'expression: «La Commission d'études ... considérant», et l'expression «à l'unanimité» ne figure pas.

2. Questions et Programmes d'études

2.1 *Indications sur la numérotation de ces textes*

2.1.1 *Questions*

Les Questions sont numérotées dans des séries différentes pour chaque Commission d'études; le cas échéant, le numéro d'ordre est suivi d'un trait d'union et d'un chiffre indiquant le nombre de révisions successives du texte. Le numéro d'une Question est suivi d'un *chiffre arabe indiquant la Commission d'études.* Exemples:

— Question 1/10 pour la première version de la Question;

— Question 1-1/10 pour sa première révision, Question 1-2/10 pour sa deuxième révision.

2.1.2 *Programmes d'études*

Les Programmes d'études sont numérotés de manière à indiquer de quelle Question ils dérivent le cas échéant, le numéro étant complété par une lettre majuscule qui permet de distinguer plusieurs Programmes d'études qui dérivent d'une même Question. La partie du numéro du Programme d'études qui sert à indiquer le numéro de la Question dont il dérive ne mentionne pas l'indice éventuel de révision de la Question, mais se réfère au texte en vigueur de cette Question tel qu'il figure dans le Volume.

Exemples:

— Programme d'études 1A/10, première version du premier Programme d'études qui dérive de la Question 1/10;

— Programme d'études 1C/10, première version du troisième Programme d'études qui dérive de la Question 1/10;

— Programme d'études 1A-1/10, première révision du premier Programme d'études qui dérive de la Question 1/10.

On remarquera qu'un Programme d'études peut être adopté sans qu'il dérive d'une Question; dans ce cas, il est numéroté d'une façon analogue à celle des autres Programmes d'études de la Commission d'études sauf que, si l'on se réfère à la liste des Questions correspondantes, on ne trouve pas de Question qui corresponde à ce numéro.

Comme pour les autres textes du CCIR, les références aux Questions et Programmes d'études à l'intérieur des textes ne font mention que du numéro principal.

2.2 *Emplacement des Questions et Programmes d'études*

Le plan de la page II désigne le Volume qui contient les textes de chaque Commission d'études, ce qui permet de savoir dans quel Volume se trouve une Question ou un Programme d'études donné.

VOLUME IV

SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Commission d'études 4)

TABLE DES MATIÈRES

		Page
Plan des Volumes I à XIV de la XV[e] Assemblée du CCIR		II
Répartition des textes de la XV[e] Assemblée plénière du CCIR parmi les Volumes I à XIV		III
Table des matières		VII
Index des textes supprimés		XIII
Index des textes par ordre numérique		XV
Index des textes publiés dans d'autres Volumes mais présentant aussi de l'intérêt pour le service fixe par satellite		XVII
Mandat de la Commission d'études 4 et Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 4		XXI
Section 4A — Définitions		
Rapport 204-5	Termes et définitions concernant les radiocommunications spatiales	1
Section 4B — Fréquences, orbites et systèmes		
Rapport 205-4	Facteurs affectant le choix des fréquences pour les télécommunications avec les stations spatiales du service fixe par satellite	5
Rapport 206-4	Considérations générales relatives au choix des caractéristiques de l'orbite dans le service fixe par satellite	8
Rapport 207-5	Caractéristiques de quelques systèmes de télécommunication par satellites, expérimentaux et en exploitation, de types courants	11
Rapport 214-3	Influence de l'effet Doppler et des discontinuités dues à la commutation dans le service fixe par satellite	22
Rapport 383-4	Influence du temps de propagation dans le service fixe par satellite	29
Rapport 451-3	Facteurs affectant la conception des systèmes et le choix des fréquences pour les liaisons inter-satellites du service fixe par satellite	37
Rapport 552-2	Utilisation des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz par le service fixe par satellite	49
Rapport 866	Répartition des brouillages dans les systèmes analogiques MF fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz dans le service fixe par satellite	65
Section 4C — Caractéristiques en bande de base		
Avis 352-4	Circuit fictif de référence pour les systèmes utilisant la transmission analogique dans le service fixe par satellite	71
Avis 353-4	Puissance de bruit admissible dans le circuit fictif de référence pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence dans le service fixe par satellite	72
Avis 354-2	Largeur de la bande vidéofréquence et niveau de bruit admissible dans le circuit fictif de référence pour le service fixe par satellite	73
Rapport 208-5	Constitution du circuit fictif de référence et normes concernant le niveau admissible de bruit pour la transmission de téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence et de télévision dans le service fixe par satellite	74
Avis 521-1	Conduit numérique fictif de référence pour les systèmes utilisant la transmission numérique dans le service fixe par satellite	79
Avis 522-1	Valeurs admissibles du taux d'erreur sur les éléments binaires à la sortie du conduit numérique fictif de référence des systèmes du service fixe par satellite utilisant la modulation par impulsions et codage pour la téléphonie	80
Avis 446-2	Dispersion de l'énergie de la porteuse pour des systèmes employant une modulation angulaire par des signaux analogiques ou une modulation numérique dans le service fixe par satellite	81

		Page
Rapport 384-4	Dispersion d'énergie dans le service fixe par satellite	82
Rapport 867	Niveau maximal admissible de brouillage des transmissions en mode SCPC dans des réseaux du service fixe par satellite	99
Avis 464-1	Caractéristiques de préaccentuation pour les systèmes à modulation de fréquence pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence dans le service fixe par satellite	102
Rapport 212-3	Emploi de la préaccentuation dans les systèmes à modulation de fréquence pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence et la télévision dans le service fixe par satellite	106
Avis 481-1	Mesures de bruit en cours de trafic pour les systèmes du service fixe par satellite pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence	109
Avis 482-1	Mesure de la qualité à l'aide d'un signal à spectre continu uniforme, pour les systèmes qui utilisent la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence dans le service fixe par satellite	111
Avis 579	Objectif de disponibilité d'un circuit fictif de référence et d'un conduit numérique fictif de référence pour la téléphonie dans le service fixe par satellite	114
Rapport 706-1	Disponibilité des circuits dans le service fixe par satellite	115
Rapport 553-2	Exploitation et maintenance des stations terriennes du service fixe par satellite	121
Rapport 707-1	Caractéristiques des jonctions numériques entre réseaux à satellite et réseaux de terre	126
Section 4D — Procédés de modulation et accès multiple		
Rapport 708-1	Techniques d'accès multiple et méthodes de modulation dans le service fixe par satellite	139
Section 4E — Caractéristiques et maintenance des stations terriennes		
Avis 465-1	Diagramme de rayonnement de référence de station terrienne, à utiliser pour la coordination et pour l'évaluation des brouillages dans la gamme des fréquences comprises entre 2 et 10 GHz environ	183
Avis 580	Diagrammes de rayonnement à utiliser comme objectifs de conception pour les antennes des stations terriennes fonctionnant avec des satellites géostationnaires	184
Rapport 391-4	Diagrammes de rayonnement des antennes de stations terriennes du service fixe par satellite à utiliser dans les études de brouillage et dans la détermination d'un objectif de conception	186
Rapport 390-4	Antennes utilisées dans les stations terriennes pour le service fixe par satellite	201
Rapport 868	Contributions à la température de bruit d'une antenne de réception de station terrienne. *Mesures de la température de bruit d'une antenne*	226
Rapport 709-1	Etude du couplage entre une antenne de station terrienne et une antenne de liaison de terre	229
Rapport 385-1	Possibilité de partage des bandes de fréquences entre les systèmes du service fixe par satellite et les services de terre. *Critères affectant le choix de l'emplacement des stations terriennes dans le service fixe par satellite*	238
Rapport 554-2	Utilisation d'une station terrienne transportable à petite antenne pour les opérations de secours en cas de catastrophes naturelles et de situations critiques analogues	240
Rapport 869	Stations terriennes de faible capacité et systèmes à satellites correspondants du service fixe par satellite	244
Section 4F — Partage des fréquences entre les réseaux du service fixe par satellite — utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires		
Avis 466-3	Niveau maximal admissible du brouillage, dans une voie téléphonique d'un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite utilisant la modulation de fréquence avec multiplexage en fréquence, produit par d'autres réseaux de ce service	259
Avis 483-1	Niveau maximal admissible du brouillage, dans un canal de télévision d'un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite utilisant la modulation de fréquence, produit par d'autres réseaux de ce service	261
Avis 523-1	Niveaux maximaux admissibles du brouillage dans un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite utilisant la téléphonie à codage mic à 8 bits, produit par d'autres réseaux de ce service	262

Page

Rapport 710-1 Répartition de brouillage dans les systèmes numériques du service fixe par satellite fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz 264

Avis 524-1 Niveaux maximaux admissibles de la densité de p.i.r.e. hors axe rayonnée par les stations terriennes du service fixe par satellite fonctionnant dans la bande des 6 GHz . 267

Avis 484-2 Maintien en position en longitude des satellites géostationnaires utilisant des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite 268

Rapport 556-2 Facteurs affectant le maintien en position des satellites géostationnaires du service fixe par satellite 269

Rapport 453-3 Facteurs techniques dont dépend l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires par des satellites de télécommunication partageant les mêmes bandes de fréquences. *Résumé général* 272

Rapport 454-3 Méthode de calcul pour déterminer s'il y a lieu de procéder à la coordination entre des réseaux à satellites géostationnaires partageant les mêmes bandes de fréquences 306

Rapport 870 Méthodes de coordination technique pour les systèmes de télécommunication par satellite 311

Rapport 871 Calcul de la température de bruit équivalente et du gain de transmission de la liaison par satellite 317

Rapport 455-3 Partage des bandes de fréquences entre des réseaux du service fixe par satellite 319

Rapport 555-2 Discrimination par l'emploi de polarisations orthogonales circulaires ou rectilignes . . . 334

Rapport 557-1 Utilisation des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite, à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante des systèmes à satellites géostationnaires 361

Rapport 558-2 Diagrammes de rayonnement d'antennes de satellite dans le service fixe par satellite . . 369

Rapport 559 Influence des caractéristiques de modulation sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires dans le service fixe par satellite 393

Rapport 711-1 Critères d'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires 402

Section 4G – Partage des fréquences entre les réseaux du service fixe par satellite et d'autres systèmes de radiocommunications spatiales

Rapport 560-2 Critères de partage des fréquences permettant d'assurer la protection des stations spatiales du service fixe par satellite recevant dans la bande de 14 à 14,4 GHz 417

Rapport 872 Critères de partage entre les liaisons inter-satellites reliant des satellites géostationnaires du service fixe par satellite et du service de radionavigation à 33 GHz 419

Rapport 561-2 Liaisons de connexion avec les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite 423

Rapport 712-1 Facteurs relatifs à la protection des stations terriennes du service fixe par satellite, fonctionnant dans les bandes de fréquences adjacentes, contre les émissions non désirées provenant de satellites de radiodiffusion fonctionnant dans des bandes situées aux environs de 12 GHz 433

Rapport 873 Analyse du brouillage causé par le service de radiodiffusion par satellite d'une région au service fixe par satellite d'une autre région aux environs des 12 GHz 444

Rapport 713-1 Rayonnements non essentiels provenant des stations terriennes et spatiales du service fixe par satellite 447

Rapport 874 Partage des fréquences entre le service inter-satellites lorsqu'il est utilisé par le service fixe par satellite et d'autres services spatiaux 454

Rapport 875 Etude des annuleurs de brouillage pour application dans le service fixe par satellite . . 456

Questions, Programmes d'études, Résolutions, Vœux et Décisions

Question 1-2/4 Antennes pour les systèmes du service fixe par satellite 465

Programme d'études 1A-1/4 Diagramme de rayonnement de référence des antennes utilisées dans les stations terriennes du service fixe par satellite 465

Programme d'études 1B/4 Caractéristiques de rayonnement des antennes de satellite du service fixe par satellite 466

Programme d'études 1C-1/4 Caractéristiques des antennes de station terrienne du service fixe par satellite 467

Page

Question 2-4/4 Caractéristiques techniques des systèmes du service fixe par satellite 467

Programme d'études 2A-4/4 Possibilité de partage des bandes de fréquences entre les systèmes du service fixe par satellite et les services de radiocommunication de terre 469

Programme d'études 2D-1/4 Caractéristiques de modulation préférées et dispersion de l'énergie dans le service fixe par satellite 470

Programme d'études 2E-1/4 Caractéristiques d'accès multiple préférées dans le service fixe par satellite 471

Programme d'études 2H-3/4 Utilisation des bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz pour les systèmes du service fixe par satellite 471

Programme d'études 2J-3/4 Facteurs techniques dont dépend l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires par des réseaux à satellite de radiocommunication partageant des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite 472

Programme d'études 2K-3/4 Liaisons de connexion pour les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite 473

Programme d'études 2L-1/4 Partage des fréquences entre, d'une part, le service de radionavigation et le service de radionavigation par satellite et, d'autre part, le service fixe par satellite fonctionnant aux fréquences de l'ordre de 14 GHz . . 474

Programme d'études 2M-1/4 Caractéristiques des liaisons de connexion du service fixe par satellite utilisées pour la connexion des satellites de divers services mobiles par satellite 475

Programme d'études 2N-1/4 Caractéristiques des jonctions pour liaisons de transmission numériques internationales dans le service fixe par satellite 476

Programme d'études 2P-1/4 Caractéristiques de système du service inter-satellites utilisé par le service fixe par satellite et problèmes de partage avec d'autres services spatiaux 477

Programme d'études 2Q/4 Intégration des systèmes à satellites dans les réseaux pour transmission de données 478

Programme d'études 2R/4 Méthodes de coordination technique des systèmes de télécommunication par satellite 478

Programme d'études 2S/4 Partage des fréquences entre les liaisons de satellite à satellite du service fixe par satellite et les services de radiocommunication de terre 479

Programme d'études 2T/4 Partage des fréquences entre le service fixe par satellite et le service de radiodiffusion par satellite 480

Programme d'études 2U/4 Partage des fréquences entre, d'une part, le service fixe par satellite et, d'autre part, le service d'exploration de la terre par satellite (détecteurs passifs) et le service de recherche spatiale (détecteurs passifs) 480

Programme d'études 2V/4 Critères de brouillage et méthodes de calcul applicables aux réseaux du service fixe par satellite utilisant la modulation numérique 481

Question 7-1/4 Variations de la transmission dans la bande de base, temps de propagation, échos et discontinuités dus à des commutations dans les systèmes du service fixe par satellite . . 481

Question 13-1/4 Facteurs qui contribuent à la température de bruit d'une antenne de réception de station terrienne 482

Question 20-1/4 Exploitation et maintenance des stations terriennes 483

Question 22-1/4 Utilisation de systèmes du service fixe par satellite en cas de catastrophes naturelles, épidémies, famines et situations critiques analogues pour les avertissements et les opérations de secours 483

Question 23/4 Stations terriennes de faible capacité et systèmes à satellites correspondants 484

Question 24-1/4 Disponibilité des circuits ou des conduits numériques et interruptions brèves de la transmission dans le service fixe par satellite pour la téléphonie et la télévision 485

Programme d'études 24A-1/4 Interruptions du trafic sur les circuits ou conduits numériques du service fixe par satellite 486

Page

Question 25-1/4 Emissions non désirées rayonnées et reçues par les stations terriennes et les stations spatiales du service fixe par satellite 487

Question 26-1/4 Etablissement de liaisons de connexion entre stations terriennes fixes et stations spatiales de divers services, dans des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite 488

Vœu 56 Démarcation entre les responsabilités du CCIR et du CCITT pour les systèmes numériques à multiplexage par répartition dans le temps du service fixe par satellite . . 489

Décision 2-4 Partage des fréquences entre satellites de radiocommunication. *Considérations techniques dont dépend l'utilisation rationnelle de l'orbite des satellites géostationnaires* 491

Index alphabétique des termes (mots clés) des Vol. IV 493

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES SUPPRIMÉS A LA FIN DE LA PÉRIODE D'ÉTUDES 1978-1982

(Pour permettre de repérer plus facilement les divers textes, le numéro de page du Volume IV de la XIV[e] Assemblée plénière (Kyoto, 1978) est indiqué.)

Texte	Titre	N° de la page Vol. IV (Kyoto, 1978)
Question 27/4	Courtes interruptions de la transmission dans le service fixe par satellite pour la téléphonie et la télévision	358

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES PAR ORDRE NUMÉRIQUE

Page

SECTION 4A: Définitions 1

SECTION 4B: Fréquences, orbites et systèmes 5

SECTION 4C: Caractéristiques en bande de base 71

SECTION 4D: Procédés de modulation et accès multiple 139

SECTION 4E: Caractéristiques et maintenance des stations terriennes 183

SECTION 4F: Partage des fréquences entre les réseaux du service fixe par satellite – Utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires 259

SECTION 4G: Partage des fréquences entre les réseaux du service fixe par satellite et d'autres systèmes de radiocommunications spatiales 417

AVIS	Section	Page
Avis 352-4	4C	71
Avis 353-4	4C	72
Avis 354-2	4C	73
Avis 446-2	4C	81
Avis 464-1	4C	102
Avis 465-1	4E	183
Avis 466-3	4F	259
Avis 481-1	4C	109
Avis 482-1	4C	111
Avis 483-1	4F	261
Avis 484-2	4F	268
Avis 521-1	4C	79
Avis 522-1	4C	80
Avis 523-1	4F	262
Avis 524-1	4F	267
Avis 579	4C	114
Avis 580	4E	184
RAPPORTS		
Rapport 204-5	4A	1
Rapport 205-4	4B	5
Rapport 206-4	4B	8
Rapport 207-5	4B	11
Rapport 208-5	4C	74
Rapport 212-3	4C	106
Rapport 214-3	4B	22
Rapport 383-4	4B	29
Rapport 384-4	4C	82
Rapport 385-1	4E	238
Rapport 390-4	4E	201
Rapport 391-4	4E	186

RAPPORTS	Section	Page
Rapport 451-3	4B	37
Rapport 453-3	4F	272
Rapport 454-3	4F	306
Rapport 455-3	4F	319
Rapport 552-2	4B	49
Rapport 553-2	4C	121
Rapport 554-2	4E	240
Rapport 555-2	4F	334
Rapport 556-2	4F	269
Rapport 557-1	4F	361
Rapport 558-2	4F	369
Rapport 559	4F	393
Rapport 560-2	4G	417
Rapport 561-2	4G	423
Rapport 706-1	4C	115
Rapport 707-1	4C	126
Rapport 708-1	4D	139
Rapport 709-1	4E	229
Rapport 710-1	4F	264
Rapport 711-1	4F	402
Rapport 712-1	4G	433
Rapport 713-1	4G	447
Rapport 866	4B	65
Rapport 867	4C	99
Rapport 868	4E	226
Rapport 869	4E	244
Rapport 870	4F	311
Rapport 871	4F	317
Rapport 872	4G	419
Rapport 873	4G	444
Rapport 874	4G	454
Rapport 875	4G	456

Note. – Les Questions, Programmes d'études, Vœux et Décisions, figurant déjà dans l'ordre numérique à la table des matières, ne sont pas repris dans le présent index.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES PUBLIÉS DANS D'AUTRES VOLUMES, MAIS PRÉSENTANT AUSSI DE L'INTÉRÊT POUR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

Texte	Titre	Volume
Rapport 656	Application des méthodes probabilistes à l'emploi efficace du spectre radioélectrique	I
Rapport 657	Modèle statistique pour la détermination des critères de partage des bandes de fréquences	I
Rapport 666	Systèmes de télécommunications utilisant le spectre des ondes électromagnétiques au-dessus de 3 000 GHz	I
Rapport 828	Résultats théoriques et expérimentaux relatifs au partage du spectre entre des systèmes MRF-MF et des systèmes radar grâce aux techniques de suppression d'impulsions	I
Rapport 829	Calcul de la probabilité de brouillage	I
Rapport 830	Emploi de suppresseurs de brouillage (SB) en vue d'accroître l'utilisation du spectre	I
Rapport 831	Amélioration de la protection des liaisons de radiocommunication contre le brouillage à l'aide d'écrans spéciaux	I
Rapport 528	Effets des brouillages dans une même voie sur les performances des systèmes à manipulation par déplacement de phase M-valents (ou systèmes MDPM)	I
Rapport 670	Niveau minimal de bruit externe: spécification mondiale (0,1 Hz à 100 GHz)	I
Rapport 276	Contrôle, dans les stations fixes de contrôle, des émissions radioélectriques en provenance des engins spaciaux	I
Rapport 181	Tolérances de fréquence des émetteurs	I
Avis 329	Rayonnements non essentiels	I
Avis 331	Bruit de fond et sensibilité des récepteurs	I
Avis 332	Sélectivité des récepteurs	I
Rapport 663	Caractéristiques de grandes antennes à réflecteurs fonctionnant en ondes millimétriques et décimillimétriques	I
Rapport 665	Systèmes d'antenne à faisceaux multiples à ondes millimétriques et centimétriques pour les communications par satellite	I
Rapport 664	Examen de l'utilisation des bandes de fréquences de 40 GHz à 3 000 GHz environ	I
Rapport 841	Application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique	I
Question 18	Conception des systèmes en vue d'une efficacité et d'une utilisation optimales du spectre	I
Question 44	Modèles de système pour l'évaluation de la compatibilité dans l'utilisation du spectre	I
Question 45	Critères techniques de partage des fréquences	I
Question 58	Partage des fréquences entre plusieurs services	I
Question 61	Identification automatique des stations	I
Question 62	Protection des équipements radioélectriques contre la foudre	I
Décision 56	Transfert de technologie	I

Texte	Titre	Volume
Programme d'études 15C	Protection du matériel de télécommunications contre les rayonnements de fréquence radioélectrique de stations terriennes de recherche spatiale	II
Rapport 546	Technologie des systèmes spatiaux utilisés dans le service de recherche spatiale: techniques de commande d'orientation	II
Rapport 675	Diagrammes de rayonnement d'antennes de stations terriennes de recherche spatiale, à utiliser dans les études de brouillage	II
Rapport 676	Antennes à faisceaux modelés	II
Rapport 843	Techniques de maintien en position applicables à des satellites géostationnaires	II
Question 19	Rayonnements non essentiels produits ou reçus par les stations des services de radiocommunications spatiales	II
Rapport 844	Probabilité de brouillage entre les systèmes de télécommunication avec l'espace lointain d'une part et les systèmes du service fixe par satellite et du service de radiodiffusion par satellite d'autre part dans des bandes de fréquences en relation harmonique	II
Question 18	Critères de protection pour les systèmes assurant des fonctions d'exploitation spatiale	II
Rapport 396	Télémesure de maintenance, poursuite et télécommande pour les satellites expérimentaux et opérationnels. *Possibilités de partage des fréquences entre les services de Terre et les liaisons de télémesure et de télécommande des satellites*	II
Avis 363	Systèmes d'exploitation spatiale. *Fréquences, largeurs de bande et critères de protection*	II
Avis 364	Liaisons avec les satellites habités ou non de recherche, proches de la Terre. *Fréquences, largeurs de bande et critères de protection*	II
Question 24	Caractéristiques des liaisons inter-satellites	II
Rapport 847	Satellites-relais de données. *Partage avec d'autres services dans les bandes 9 et 10*	II
Rapport 685	Critères de protection et considérations relatives au partage dans le cas de la recherche dans l'espace lointain	II
Avis 578	Critères de protection et considérations relatives au partage pour la recherche dans l'espace lointain	II
Rapport 540	Possibilité de partage des fréquences entre un système du service d'exploration de la Terre par satellite et des systèmes du service fixe par satellite, du service de météorologie par satellite et des services fixe et mobile de Terre	II
Rapport 694	Considérations sur le partage des fréquences et critères de protection dans le cas des détecteurs passifs à hyperfréquences	II
Rapport 850	Partage des fréquences entre les détecteurs passifs et les services fixe, mobile (sauf mobile aéronautique) et fixe par satellite dans la bande 18,6 – 18,8 GHz. *Restrictions minimales à imposer aux autres services afin de garantir un fonctionnement satisfaisant des détecteurs passifs*	II
Rapport 224	Critères de protection du service de radioastronomie contre les brouillages	II
Rapport 697	Brouillages causés au service de radioastronomie par des émetteurs fonctionnant dans d'autres bandes	II
Avis 517	Protection du service de radioastronomie contre les émetteurs fonctionnant dans les bandes adjacentes	II
Rapport 719	Affaiblissement par les gaz de l'atmosphère	V
Rapport 720	Emission radioélectrique produite par des sources naturelles au-dessus de 50 MHz environ	V

Texte	Titre	Volume
Rapport 721	Affaiblissement dû aux hydrométéores, en particulier aux précipitations et autres particules atmosphériques	V
Rapport 722	Transpolarisation due à l'atmosphère	V
Rapport 723	Statistiques relatives au mois le plus défavorable	V
Avis 530	Données sur la propagation nécessaires pour la conception de faisceaux hertziens transhorizon à diffusion troposphérique, à visibilité directe de Terre, et de système de télécommunication Terre-espace	V
Rapport 564	Données sur la propagation nécessaires pour les systèmes de télécommunication spatiale	V
Rapport 884	Données sur la propagation nécessaires pour les services mobiles maritime et terrestre par satellite au-dessus de 100 MHz	V
Avis 452	Données relatives à la propagation nécessaires à l'évaluation des brouillages dans les services spatiaux ou dans les services de Terre ou entre eux, et pour le calcul des distances de coordination	V
Rapport 569	Evaluation des facteurs de propagation liés aux problèmes de brouillage entre stations situées sur la surface de la Terre aux fréquences supérieures à 0,5 GHz	V
Rapport 724	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation de la distance de coordination dans la gamme de fréquences de 1 à 40 GHz	V
Rapport 885	Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation du brouillage entre stations dans l'espace et stations à la surface de la Terre	V
Rapport 887	Modèles de plasmas extraterrestres	VI
Rapport 917	Niveaux de brouillage admissibles dans les voies téléphoniques du service mobile maritime par satellite	VIII
Avis 496	Limites de la puissance surfacique des émetteurs de radionavigation pour assurer la protection des récepteurs des stations spatiales du service fixe par satellite dans la bande des 14 GHz	VIII
Rapport 772	Espacements orbitaux à respecter pour un service mobile par satellite	VIII
Rapport 773	Principe de l'utilisation des contours de coordination et de protection pour la coordination des stations terriennes mobiles	VIII
Programme d'études 17A	Caractéristiques techniques des systèmes employant les techniques de télécommunication par satellite pour assurer des communications et/ou un service de radiorepérage à l'intention des aéronefs et/ou des navires	VIII
Avis 390	Définitions des termes et références concernant les circuits fictifs de référence et les conduits numériques fictifs de référence pour les faisceaux hertziens	IX
Rapport 614	Diagrammes de rayonnement de référence pour antennes de faisceaux hertziens	IX
Rapport 789	Protection des faisceaux hertziens de Terre en visibilité directe contre les brouillages dus au service de radiodiffusion par satellite dans la bande de 11,7 à 12,75 GHz	IX
Rapport 951	Partage entre le service inter-satellites et le service de radiodiffusion par satellite au voisinage de 23 GHz	X/XI
Rapport 952	Caractéristiques techniques des liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion	X/XI
Question 1/10 et 11	Service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision): *Protection contre le brouillage*	X/XI

Texte	Titre	Volume
Programme d'études 2E/10 et 11	Rayonnement d'émissions non désirées par les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision)	X/XI
Programme d'études 2J/10 et 11	Caractéristiques techniques et méthodes de planification des liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion (télévision) dans la bande des 12 GHz dans les Régions 1 et 3	X/XI
Vœu 38	Echange de programmes de télévision monochrome et en couleur par l'intermédiaire de satellites	XI
Rapport 639	Disponibilité d'un circuit international ou d'une chaîne internationale de télévision	XII
Avis 570	Utilisation d'un signal d'essai normalisé comme charge conventionnelle sur une voie de télévision	XII
Rapport 643	Utilisation d'un signal d'essai normalisé comme charge conventionnelle sur une voie de télévision	XII
Rapport 488	Transmission de signaux son et de signaux image en multiplexage par répartition dans le temps ou par répartition en fréquence	XII
Rapport 970	Caractéristiques des signaux en vidéofréquence. *Limitation des composantes spectrales hors bande*	XII
Programme d'études 13E	Modulation des signaux de télévision par le bruit, en raison de la gigue de phase de l'onde porteuse. *Niveaux admissibles*	XII
Programme d'études 14A	Transmission numérique des signaux de télévision	XII
Programme d'études 15G	Modulation des signaux de télévision par le bruit, en raison de la gigue de phase de l'onde porteuse. *Méthode de mesure*	XII
Programme d'études 16C	Objectifs de disponibilité applicables aux systèmes de transmission de télévision utilisant la modulation numérique	XII
Programme d'études 18A	Normes pour la transmission numérique des signaux radiophoniques	XII
Programme d'études 19C	Modulation, par le bruit, des signaux de radiodiffusion sonore, en raison de la gigue des ondes porteuses	XII
Programme d'études 21D	Caractéristiques des signaux vidéofréquence	XII
Avis 971	Terminologie générale des télécommunications. *Termes communs au CCIR et au CCITT*	XII
Avis 573	Vocabulaire des radiocommunications	XII
Avis 607	Termes et abréviations relatifs aux quantités d'information en télécommunications	XII
Avis 431	Nomenclature des bandes de fréquences et de longueurs d'onde employées en télécommunication	XII
Avis 574	Grandeurs et unités logarithmiques	XII
Résolution 66	Termes et définitions	XII
Décision 18	Systèmes numériques pour la transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision	XII
Décision 19	Termes et définitions	XII

SERVICE FIXE PAR SATELLITE

COMMISSION D'ÉTUDES 4

Mandat:

Etudier les questions relatives aux systèmes du service fixe par satellite et aux liaisons inter-satellites dans le service fixe par satellite (y compris les fonctions de poursuite, télémesure et télécommande associées).

1978-1982	*Rapporteur principal:*	E. R. GRAIG (Australie)
	Vice-Rapporteur principal:	E. HAUCK (Suisse)
1982-1986	*Rapporteur principal:*	E. R. GRAIG (Australie)
	Vice-Rapporteurs principaux:	E. HAUCK (Suisse) G. MESIAS (Colombie) P. REMIDI (Indonésie)

INTRODUCTION PAR LE RAPPORTEUR PRINCIPAL DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 4

Le service fixe par satellite se prête aux applications les plus variées. Dans un premier temps, il a été utilisé pour l'établissement de communications à très grande distance, et cette application continue de se développer rapidement. Ces dernières années, le service a été mis en œuvre pour des communications régionales et nationales; cette application s'est, elle aussi, développée et l'on prévoit que ce développement va s'accélérer grâce aux progrès accomplis en matière d'équipements économiques pour les stations terriennes. Une autre application importante du service fixe par satellite est l'établissement de liaisons de connexion, dans les deux sens, avec les stations spatiales d'autres services. Ces liaisons existent déjà dans le service mobile maritime par satellite et on prépare actuellement la mise en place de liaisons de connexion pour le service de radiodiffusion par satellite.

Jusqu'à présent, le service fixe par satellite a été exploité principalement en transmission analogique, avec un seul bond par satellite et utilisation de fréquences inférieures à 10 GHz. Or, les progrès accomplis en électronique, qui conduisent à l'évolution des réseaux de Terre vers la constitution de réseaux numériques intégrés et, ultérieurement, de réseaux numériques avec intégration des services, favorisent également l'emploi du traitement numérique des signaux et de la transmission numérique dans le service fixe par satellite.

On constate un encombrement des bandes de fréquences inférieures à 10 GHZ et de l'orbite des satellites géostationnaires, utilisée actuellement pour presque tous les satellites de télécommunication; c'est dire l'importance des techniques qui permettent une utilisation plus efficace de la ressource spectre radioélectrique/orbite en augmentant les possibilités de cette ressource. On a recours de plus en plus à la réutilisation des fréquences par discrimination de polarisation et à l'emploi de faisceaux de rayonnement ponctuels multiples, et il existe déjà des systèmes fonctionnant sur des fréquences supérieures à 10 GHz. On envisage aussi d'utiliser dans l'avenir des liaisons satellite-satellite pour accroître l'utilisation du spectre/orbite et pour améliorer la souplesse d'exploitation des réseaux à satellite.

Ce sont les Conférences administratives des radiocommunications qui définissent le cadre réglementaire de ces applications du service fixe par satellite et l'utilisation plus intensive de la ressource spectre/orbite. L'étude des bases techniques à fournir à ces conférences et des moyens techniques à mettre en œuvre pour leur permettre de formuler certaines de leurs décisions est une tâche permanente. L'évolution technologique, qui conduit à de nouvelles applications, et la mise au point de nouveaux procédés de partage des fréquences, posent des problèmes de coordination extrêmement complexes. Pour résoudre ces problèmes, il faut se mettre d'accord sur les caractéristiques techniques et d'exploitation et sur les restrictions à imposer aux services qui ont recours au partage.

C'est dans ce contexte que la Commission d'études 4 poursuit ses travaux. Le résumé qui suit décrit, dans leurs grandes lignes, les progrès qui ont été accomplis depuis la dernière Assemblée plénière (1978).

1. Questions et Programmes d'études

Des changements importants ont été apportés au programme de travail de la Commission d'études 4, pour tenir compte des nouvelles applications et des nouvelles techniques du service fixe par satellite et pour donner suite aux demandes des Conférences administratives. À cet égard, il faut mentionner la CAMR-79, dont les Actes finals mentionnent un grand nombre d'études devant être faites par le CCIR, et la préparation technique de deux

conférences: la Conférence administrative régionale pour la planification du service de radiodiffusion par satellite dans la Région 2 (1983) et la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et la planification des services spatiaux utilisant cette orbite (1985).

Une grande partie de ce travail pourrait être accomplie moyennant des modifications mineures du texte des Questions et Programmes d'études existants. Toutefois, il a fallu modifier profondément le texte du Programme d'études 2K/4 relatif aux liaisons de connexion pour les stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite; de la Question 26/4 relative aux liaisons de connexion entre les stations terriennes du service fixe par satellite et les stations spatiales d'autres services; de la Question 24/4 relative à la disponibilité des circuits ou des conduits numériques et aux interruptions brèves de la transmission dans le service fixe par satellite pour la téléphonie et la télévision; et le texte de la Question 25/4 relative aux émissions non essentielles rayonnées et reçues par les stations terriennes et les stations spatiales du service fixe par satellite. Par ailleurs, il a fallu élaborer cinq nouveaux Programmes d'études, à savoir:

- 2R/4 – Méthodes de coordination technique des systèmes de télécommunication par satellite.
- 2S/4 – Partage des fréquences entre le service inter-satellites utilisé pour des liaisons du service fixe par satellite et les services de radiocommunication de Terre.
- 2T/4 – Partage des fréquences entre le service fixe par satellite et le service de radiodiffusion par satellite.
- 2U/4 – Partage des fréquences entre, d'une part, le service fixe par satellite et, d'autre part, le service d'exploration de la Terre par satellite (détecteurs passifs) et le service de recherche spatiale (détecteurs passifs).
- 2V/4 – Critères de brouillage et méthodes de calcul applicables aux réseaux du service fixe par satellite utilisant la modulation numérique.

2. Nouveaux Avis

Le nouvel Avis 579 traite d'un objectif de disponibilité pour un circuit fictif de référence et un conduit numérique fictif de référence pour la téléphonie dans le service fixe par satellite. A titre provisoire, cet objectif a été fixé à un minimum de 99,8% par an. Les dispositions de cet Avis s'inspirent de la pratique suivie dans les systèmes de Terre en câble et en faisceaux hertziens, et il applique les notions et la terminologie élaborées par la Commission mixte CMBD (Commission mixte CCITT/CCIR). L'Avis 579 ne s'applique pas à certains phénomènes, par exemple, les effets produits par les interruptions de la propagation, notamment pour les services fonctionnant sur des fréquences supérieures à environ 10 GHz. Ces problèmes doivent faire l'objet d'un complément d'étude, comme indiqué dans le Rapport 706 qui fait pendant à l'Avis.

La Commission d'études a élaboré un autre Avis nouveau (Avis 580) qui traite des diagrammes de rayonnement à utiliser comme objectifs de conception pour les antennes des stations terriennes fonctionnant avec des satellites géostationnaires. Cet Avis a pour objet de favoriser le perfectionnement des antennes futures, par l'application de certains procédés existants. On a là un moyen d'accroître l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires; dans les directions orientées vers cette orbite, pour ses antennes ayant un rapport D/λ qui dépasse 150, l'objectif relatif aux lobes latéraux est supérieur de 3 dB à la caractéristique correspondante indiquée dans l'Avis 465. Les renseignements pour les antennes ayant un rapport D/λ inférieur à 150 ne sont pas disponibles actuellement pour permettre de déterminer un objectif de conception pour ces antennes plus petites et en conséquence les administrations sont instamment priées d'examiner cette question et de fournir des renseignements pour accélérer les études au cours de la période 1982-1986. L'Avis 465 demeure applicable dans les études de coordination et l'évaluation du brouillage, dans les cas où on ne possède pas de renseignements particuliers sur le diagramme de rayonnement de l'antenne de la station terrienne concernée. La raison d'être du nouvel Avis est expliquée dans les nombreuses adjonctions qui ont été faites au Rapport 391, lequel contient maintenant des renseignements nouveaux sur les antennes de petites dimensions (D/λ inférieur à 100) et des indications sur la manière d'évaluer les niveaux de crête dans les lobes latéraux. Par ailleurs, le Rapport invite les administrations à soumettre des données parallèlement au progrès des techniques.

3. Modifications des Avis existants

De petites modifications ont été apportées à sept Avis. A ce titre, il faut noter en particulier que les études doivent être poursuivies pour faire en sorte que l'Avis 522 (Valeurs admissibles du taux d'erreur sur les éléments binaires à la sortie du conduit numérique fictif de référence) puisse s'appliquer aux systèmes numériques autres que les systèmes MIC.

Le champ d'application de trois autres Avis a été considérablement étendu. Deux de ces textes traitent de la valeur maximale admissible du niveau de brouillage dans une voie téléphonique d'un réseau à satellite géostationnaire, produit par d'autres réseaux; la modification a consisté à porter de 10 à 15 GHz la fréquence limite applicable. L'Avis 466 s'applique aux systèmes MRF-MF et l'Avis 523 à la téléphonie à codage MIC à 8 bits; dans les deux cas, il est nécessaire et urgent de poursuivre l'étude en vue de porter la fréquence limite à une valeur supérieure à 15 GHz. A cet égard, le Rapport 710 (Allocations de brouillage dans les systèmes numériques fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz) donne maintenant un exemple de calcul pour un système MDPC bivalent à 30/20 GHz.

Avec les adjonctions qui ont été faites à l'Avis 524 (niveaux maximaux admissibles de la densité de p.i.r.e. hors axe rayonné par les stations terriennes fonctionnant dans la bande des 6 GHz), ce texte s'applique maintenant aux systèmes à une seule voie par porteuse (SCPC), que ceux-ci utilisent la modulation de fréquence ou la modulation MDP.

4. Caractéristiques techniques et exploitation

Les Rapports traitant de ces sujets ont été considérablement augmentés et modifiés.

Le Rapport 383 traite de l'influence du temps de propagation dans le service fixe par satellite. Les sections 3 et 7 de ce Rapport ont été modifiées en fonction de la révision de l'Avis G.114 du CCITT. On y a inclus des renseignements nouveaux sur les compensateurs d'écho.

En raison de l'utilisation croissante des méthodes numériques dans les réseaux de Terre et les réseaux à satellite, il est important de poursuivre l'étude des caractéristiques des interfaces numériques. Le Rapport 707, qui traite de ce sujet, a été revisé. On y insiste davantage sur le problème de la connexion entre réseaux appliquant des rythmes d'horloge différents et ce texte contient une nouvelle section relative aux interfaces pour signaux de télévision numériques.

Le Rapport relatif aux techniques d'accès multiple et de modulation (Rapport 708) contient maintenant des renseignements sur les divers types de répéteurs utilisés dans les stations spatiales. Il a aussi été complété par des Annexes qui donnent une comparaison entre les méthodes de modulation binaire et une analyse de la transmission pour des porteuses MRF-MF avec compression-extension et concentration des conversations.

Le Rapport 553 (Exploitation et maintenance des stations terriennes) a été complété par de très nombreux renseignements sur la conception des stations terriennes automatiques, y compris l'utilisation de systèmes de contrôle modernes mettant en œuvre des micro-ordinateurs. Il comporte aussi une nouvelle Annexe qui traite de la compatibilité des procédures et des équipements utilisés pour les mesures des paramètres d'émission au niveau des fréquences intermédiaires et de la bande de base.

Des modifications importantes ont été apportées à deux Rapports relatifs à la conception des systèmes. Dans le Rapport 451 (Facteurs affectant la conception des systèmes et le choix des fréquences pour les liaisons inter-satellites), on a ajouté dans une Annexe II des renseignements nouveaux concernant la réutilisation des fréquences sur des liaisons inter-satellites (géostationnaires) utilisant des antennes de poursuite. Le Rapport 552 (Utilisation des bandes de fréquence supérieures à 10 GHz) comporte des adjonctions importantes où l'on trouve des éléments d'information nouveaux sur ce sujet. Parmi ceux-ci, il convient de mentionner des indications nouvelles sur deux techniques (fonctionnement en diversité d'emplacement et régulation de puissance sur la liaison montante); ces techniques, qui sont maintenant applicables, permettent de réduire les effets à court terme de l'affaiblissement dû à la pluie, effets dont l'importance est d'autant plus grande que la fréquence de fonctionnement est plus élevée.

Trois nouveaux Rapports traitent des marges de brouillage. Ce problème important demeure en vedette, compte tenu des nouvelles possibilités de partage des fréquences introduites par la CAMR-79 et de la nécessité de mettre en service de nouveaux réseaux à satellite. La limitation des effets de brouillage est une des conditions les plus importantes pour une utilisation plus intensive de la ressource spectre/orbite. Le nouveau Rapport 867 traite du niveau maximal admissible de brouillage des transmissions en mode SCPC, notamment sous l'effet des transmissions de télévision en modulation de fréquence; dans ce Rapport, on propose un critère approprié au cas d'une seule source de brouillage. Le nouveau Rapport 866 porte sur la répartition des brouillages dans les systèmes analogiques MF fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz; toutefois, les conclusions qu'il renferme sont encore provisoires et de nature qualitative surtout pour les fréquences supérieures à 15 GHz. Il est donc nécessaire de poursuivre l'étude de ce problème, pour ouvrir la voie à l'utilisation des bandes élevées au cours des prochaines années.

Les annuleurs de brouillage fournissent la possibilité d'appliquer une nouvelle technique prometteuse qui a fait ses preuves en laboratoire sous différentes formes. Cette technique permet de limiter ou de compenser le brouillage en utilisant un échantillon, convenablement traité, d'un signal provenant de la source brouilleuse et appliqué en opposition de phase dans le système de réception. Le procédé peut être employé en fréquence intermédiaire ou en radiofréquence. La méthode est décrite dans le nouveau Rapport 875, où il est proposé que le CCIR poursuive l'étude et suive les progrès de cette technique.

Des mesures intéressantes, effectuées aux Pays-Bas, ont fourni des données sur la contribution à la température de bruit des antennes de réception de stations terriennes à 11 et 17 GHz. Ces résultats sont consignés dans le nouveau Rapport 868, où les administrations sont invitées à présenter d'autres données sur ce sujet. Le Rapport 709 traite du couplage entre des antennes de stations terriennes et des antennes de faisceaux hertziens implantées à proximité; il a été complété par de nombreux renseignements sur la possibilité de réaliser une telle implantation, et par une Annexe qui donne les résultats de quelques études expérimentales.

Des renseignements nouveaux ont été ajoutés au Rapport 558, concernant les diagrammes d'antenne de satellites. Ce texte a été mis à jour par inclusion des résultats obtenus grâce à l'utilisation de faisceaux modelés pour mieux faire correspondre la forme des «empreintes» des antennes et celle de la zone de service requise.

La discrimination de polarisation est un procédé efficace pour accroître la capacité de l'orbite des satellites géostationnaires. Le Rapport 555, qui traite de ce sujet, expose les conditions à remplir pour les systèmes d'antenne des stations spatiales et des stations terriennes. Ce Rapport a dû être revisé en profondeur, pour tenir compte des progrès récents; il a été complété par une nouvelle Annexe qui décrit deux méthodes de mesure de la dépolarisation des antennes de stations terriennes.

5. Partage des fréquences et coordination

Les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite font partie du service fixe par satellite; à ce titre, elles sont étudiées par la Commission d'études 4. Cependant, elles réalisent des liaisons de transmission qui doivent être compatibles avec les satellites de radiodiffusion qu'elles desservent, d'où la nécessité d'une liaison étroite, sur ce sujet, entre la Commission d'études 4 et les Commissions d'études 10 et 11. Le Rapport de la Commission d'études 4 relatif aux liaisons de connexion est le Rapport 561; il a été profondément modifié par inclusion des renseignements nouveaux résultant des études effectuées comme conséquence des Actes finals de la CAMR-RS-77 et de la CAMR-79; il contient aussi des données techniques à l'intention de la CARR-82 (Région 2).

Le nouveau Rapport 873 intéresse, lui aussi, la préparation de la CARR-82 (Région 2), à la suite d'une décision de la CAMR-79. Ce Rapport traite de la protection, dans les bandes de fréquences partagées, du service fixe par satellite d'une région donnée contre les effets des satellites de radiodiffusion utilisés dans une autre région. Les conclusions montrent que des difficultés peuvent se présenter, selon les caractéristiques techniques particulières du satellite du service fixe et du satellite de radiodiffusion.

Deux nouveaux Rapports sont consacrés au partage entre le service inter-satellites et d'autres services. Le Rapport 874 traite du partage avec le service d'exploration de la Terre (détecteurs passifs) et le service de recherche spatiale (détecteurs passifs), et avec le service de radiodiffusion par satellite. Dans chaque cas, on a conclu que le partage semble possible, mais l'étude doit être poursuivie pour obtenir des éléments d'information supplémentaires, afin de contrôler les hypothèses sur lesquelles repose ce Rapport. L'autre Rapport (872) traite plus spécialement des critères de partage entre le service inter-satellites et le service de radionavigation à 33 GHz. L'étude qui a abouti à l'établissement de ce Rapport était nécessaire parce que le partage entre ces deux services est maintenant autorisé dans le Tableau d'attribution des bandes de fréquences faisant partie des Actes finals de la CAMR-79. Cette étude a permis de formuler la conclusion suivante: il ne devrait pas y avoir de problèmes de brouillage si l'angle de séparation entre les deux satellites du service inter-satellites est inférieur ou égal à 90°. Des brouillages pourraient se produire avec des angles de séparation plus grands, mais il faut poursuivre l'étude pour déterminer les limites applicables.

Deux Rapports ont été modifiés et deux nouveaux Rapports ont été établis, concernant les procédures et les calculs de coordination. Ces textes tiennent compte des modifications introduites par la CAMR-79 et traitent de sujets qui n'étaient pas abordés dans les textes antérieurs du CCIR.

Le nouveau Rapport 870, qui décrit des méthodes de coordination technique pour les systèmes de télécommunication par satellite, est le résultat des premières études entreprises au titre du nouveau Programme d'études 2R/4. Il résume les diverses méthodes, procédures et techniques auxquelles on peut avoir recours dans les opérations de coordination et est rédigé avec une intention pédagogique, instruisant le lecteur sur les diverses opérations et variantes possibles. Le Rapport 454 décrit la méthode de calcul à utiliser pour déterminer si une coordination est nécessaire entre des réseaux à satellite géostationnaire; ce texte a été profondément remanié pour rendre l'exposé plus clair. Le Rapport 455 (Partage des bandes de fréquences entre des réseaux du service fixe par satellite) contient, dans son paragraphe 5, des éléments d'information nouveaux qui décrivent les moyens techniques disponibles pour faciliter la coordination entre les réseaux; une nouvelle Annexe II traite de la relation entre les rapports $\Delta T/T$ et les critères de brouillage unique. Pour compléter le tableau, le nouveau Rapport 871 donne des indications sur le calcul de la température de bruit équivalente d'une liaison par satellite et sur le gain de transmission; il faut connaître les valeurs de ces paramètres pour pouvoir faire les calculs de coordination, mais ce sujet n'était pas encore traité dans des textes antérieurs.

Comme par le passé, les textes relatifs au partage des fréquences et à la coordination entre le service fixe par satellite et le service fixe (faisceaux hertziens de Terre) ont été étudiés et préparés en coopération étroite avec la Commission d'études 9; ils sont présentés conjointement par les deux Commissions d'études. On pourra se reporter, à cet égard, à la section pertinente du rapport du Rapporteur principal de la Commission d'études 9.

6. Utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires

Un des problèmes les plus importants au programme de la Commission d'études 4 est l'étude des dispositions à prendre pour améliorer la capacité de communication de l'orbite des satellites géostationnaires. Cette orbite est utilisée par presque tous les réseaux du service fixe par satellite, et il faudra rendre cette utilisation de plus en plus efficace si l'on veut pouvoir répondre comme il convient aux demandes futures. Un Groupe de travail intérimaire spécial (GTI 4/1), créé en 1968, s'est réuni onze fois pour étudier ce problème en profondeur. Il s'agit d'un problème complexe, qui a des aspects techniques, économiques, de propagation et d'exploitation, et les études sont loin d'être terminées. Cela étant, le GTI 4/1 sera reconduit au cours de la prochaine période d'études, comme expliqué ci-après.

Le Rapport de base sur ce sujet (Rapport 453) a subi plusieurs modifications importantes. La plus importante est une révision du paragraphe 12, pour décrire les mesures qui pourraient être mises en application progressivement, de préférence sous la forme d'une série d'Avis, pour améliorer l'économie d'utilisation de l'orbite. Un de ces Avis a déjà été formulé; il s'agit du nouvel Avis 580 relatif aux objectifs de conception pour diagrammes de rayonnement des antennes. Par ailleurs, on a complété le Rapport 453 par une Annexe qui décrit une méthode de présentation des calculs de brouillage dans le cas de deux systèmes à satellites adjacents.

Les autres rapports dans lesquels on trouve des renseignements sur certains problèmes techniques particuliers posés par le partage de l'orbite et du spectre sont les Rapports 388, 390, 455, 555, 556, 557, 558, 559 et 561. Comme tous ces textes, le Rapport 711 contient un exposé général relatif aux critères d'utilisation efficace de l'orbite. Ce texte a été complété par des indications sur l'utilisation de faisceaux ponctuels et par la spécification d'un ensemble de paramètres qui pourraient servir à définir un système de télécommunication par satellite de référence.

Pour certaines bandes de fréquences, les parties les plus encombrées de l'orbite géostationnaire approchent de la saturation; d'autre part, on prévoit que cette orbite sera de plus en plus sollicitée pour la mise en place de nouveaux systèmes dans toute une série de services. Il n'est donc pas surprenant qu'on ait élargi, ces dernières années, le champ d'application des études sur l'utilisation de l'orbite, qui sont devenues extrêmement urgentes. Cette exigence a été soulignée par la Résolution N° 3 de la CAMR-79, relative à l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et à la planification des services spatiaux utilisant cette orbite. Dans cette Résolution, la CAMR-79 a décidé la convocation, en deux sessions, d'une Conférence administrative mondiale des radiocommunications spatiales afin de garantir concrètement à tous les pays un accès équitable à l'orbite des satellites géostationnaires et aux bandes de fréquences attribuées aux services spatiaux. Elle a aussi invité le CCIR à effectuer des études préparatoires et à fournir à la première session de la Conférence des renseignements techniques concernant les principes, les critères et les paramètres techniques, y compris ceux dont on a besoin pour la planification des services spatiaux. A sa 36e session, le Conseil d'administration a décidé que la première session de la Conférence se tiendrait de la fin juin à la mi-août 1985 et qu'elle durerait six semaines.

En raison du grand nombre des services spatiaux qui doivent utiliser l'orbite, les études préparatoires du CCIR nécessitent la participation des Commissions d'études 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11, en plus de la Commission d'études 4. Il n'a pas été facile de mettre en place, avant la XVe Assemblée plénière, l'organisation nécessaire pour cette coopération dans un cadre formel, en vue de l'approbation d'un rapport du CCIR à la Conférence. Pourtant, le temps imparti pour l'établissement de ce rapport est extrêmement court et de nombreux aspects doivent être étudiés en profondeur. Aussi, à la suite d'entretiens entre le Directeur du CCIR et les Rapporteurs et Vice-Rapporteurs principaux des Commissions d'études, à la suite aussi d'une étude ultérieure effectuée à l'occasion des réunions intérimaires de 1980, des dispositions provisoires ont été prises pour mettre en route et faire progresser les études. Cela a permis au GTI 4/1 de fonctionner comme Groupe de travail intérimaire mixte (commun à plusieurs Commissions d'études), pour préparer un rapport technique provisoire destiné à la XVe Assemblée plénière. Ce Rapport contient des textes qui ont été fournis par la Commission d'études 2 (GTI 2/1), la Commission d'études 7 (GTI 7/4), la Commission d'études 8 (GTI 8/7) et les Commissions d'études 10 et 11 (GTI 10-11/1). On y trouve aussi un chapitre consacré à la propagation, qui a été fourni par les Commissions d'études 5 et 6.

Ces arrangements provisoires sont détaillés dans la Décision 2-3. Ils devaient être appliqués en totalité jusqu'à la XVe Assemblée plénière seulement; après cela, le GTI 4/1 reprendra son rôle initial de groupe spécialisé de la Commission d'études 4 pour le traitement des problèmes intéressant le service fixe par satellite. A ce titre, il continuera à participer aux études du CCIR sur l'utilisation de l'orbite.

7. Problèmes intéressant les pays en développement

Donnant suite à la Résolution N° 18 de la Conférence de plénipotentiaires de Malaga-Torremolinos (1973), la XIIIe Assemblée plénière a adopté la Question 23/4, relative aux stations terriennes de faible capacité et aux systèmes à satellites correspondants. Les contributions présentées à la réunion intérimaire de la Commission d'études 4 en 1980 ont permis de formuler une réponse préliminaire à cette Question, sous la forme d'une nouvelle Annexe qui a été ajoutée au Rapport 708. La Commission d'études a examiné plusieurs autres contributions à sa réunion finale de 1981, et cette importante documentation supplémentaire a fourni la matière du nouveau Rapport 869, qui remplace l'Annexe au Rapport 708. Le nouveau Rapport est un exposé des options techniques qui commencent à apparaître et qui permettraient de doter les pays en développement des moyens nécessaires pour la mise en œuvre de réseau de télécommunication à satellite propres à répondre aux besoins de ces pays. Il passe en revue les facteurs de conception correspondants et conclut que des solutions faisant appel aux paires de bandes 4/6 GHz et 11/14 GHz sont pratiquement réalisables. Le choix des bandes de fréquences et d'autres paramètres de conception dépend des contraintes particulières à tel ou tel système. Pour cette raison, et aussi parce que les perfectionnements techniques entraînent sans cesse l'apparition de nouvelles options, il n'était pas indiqué de décrire en détail un type de système particulier. Cependant, les Annexes au Rapport donnent des exemples de calculs de liaison et des exemples de paramètres de systèmes qui illustrent certaines des solutions envisageables au stade actuel du développement technique.

En application d'une décision prise à la réunion intérimaire de la Commission d'études 4 en 1980, on a créé un Groupe ad hoc (appelé Groupe MSFS) chargé de préparer un manuel sur le service fixe par satellite. Ce Groupe, dont les travaux sont coordonnés par M. Salomon de l'Administration française, travaille principalement par correspondance. Le but de ce travail est de regrouper de la documentation contenue dans les textes existants du CCIR, pour produire une publication unique, commode à consulter, traitant de la technologie du service fixe par satellite, avec des exemples de calcul et des commentaires utiles. L'ouvrage est conçu principalement comme un manuel d'initiation et de référence à l'usage des ingénieurs qui travaillent quelque peu sur les travaux du Groupe autonome spécialisé (GAS 8) créé par la VII^{e} Assemblée plénière du CCITT, qui a pour tâche d'étudier les «impacts économiques et techniques de la mise en œuvre d'un réseau régional de télécommunication par satellite». Toutefois, une coordination a été mise en place entre les Groupes, afin d'éviter une duplication des travaux.

Les études du Groupe MSFS progressent de façon satisfaisante. Conscient de la nécessité de publier le manuel le plus rapidement possible, le Groupe pense pouvoir achever son travail dans le courant de l'année 1982.

SECTION 4A: DÉFINITIONS

Rapport

RAPPORT 204-5

TERMES ET DÉFINITIONS CONCERNANT LES RADIOCOMMUNICATIONS SPATIALES

(1963-1966-1970-1974-1978-1982)

Les termes et définitions concernant les systèmes, services et stations spatiaux figurent dans le Règlement des radiocommunications et ne sont pas reproduits dans le présent Rapport.

Engin spatial

Engin construit par l'homme et destiné à aller au-delà de la partie principale de l'atmosphère terrestre.

Espace lointain

Région de l'espace située à des distances de la Terre supérieures ou approximativement égales à la distance entre la Terre et la Lune.

Sonde spatiale

Engin spatial destiné à effectuer des observations ou des mesures dans l'espace.

Sonde spatiale lointaine

Sonde spatiale destinée à aller dans l'espace lointain.

Satellite

Corps tournant autour d'un autre corps de masse prépondérante et dont le mouvement est principalement déterminé, d'une façon permanente, par la force d'attraction de ce dernier.

Note. – Un corps répondant à cette définition et qui tourne autour du Soleil est appelé «planète ou planétoïde».

Satellite actif

Satellite portant une station destinée à émettre ou à retransmettre des signaux de radiocommunication.

Satellite réflecteur

Satellite destiné à transmettre des signaux de radiocommunication par réflexion.

Corps principal (pour un satellite)

Corps dont l'attraction détermine principalement le mouvement d'un satellite.

Orbite

Trajectoire que décrit, par rapport à un système de référence spécifié, le centre de gravité d'un satellite, ou autre corps spatial, soumis aux seules forces d'origine naturelle, essentiellement les forces de gravitation; par extension, trajectoire que décrit le centre de gravité d'un corps spatial soumis aux forces d'origine naturelle auxquelles s'ajoutent éventuellement des actions correctives de faible énergie, exercées par un dispositif de propulsion et destinées à obtenir et conserver la trajectoire voulue.

Orbite non perturbée (d'un satellite)

Orbite d'un satellite dans le cas idéal où le satellite serait soumis uniquement à l'attraction du corps principal supposé concentré en son centre de gravité.

Note. – Dans un système de référence dont le centre est le centre de gravité du corps principal, et dont les axes ont des directions fixes par rapport aux étoiles, l'orbite non perturbée est une conique.

Eléments d'une orbite (de satellite ou autre corps spatial)

Paramètres permettant de définir la forme, les dimensions et la position de l'orbite d'un corps dans l'espace ainsi que la période de ce corps, par rapport à un système de référence spécifié.

Note 1. – Pour déterminer la position d'un corps dans l'espace à tout moment, il est nécessaire de connaître, outre les éléments de son orbite, la position sur cette orbite de son centre de gravité à un instant donné.

Note 2. – Le système de référence employé est un trièdre trirectangle direct OXYZ ayant son sommet au centre de gravité du corps principal et dont le troisième axe OZ est perpendiculaire au plan principal de référence, appelé également plan fondamental de référence, ou plus simplement plan de référence.

Note 3. – Pour un satellite artificiel de la Terre, le plan de référence est le plan de l'équateur terrestre, et le troisième axe OZ est orienté du sud au nord.

Arc de visibilité

Partie commune de l'arc de l'orbite des satellites géostationnaires sur lequel la station spatiale est visible au-dessus de l'horizon local, à partir de chacune des stations terriennes qui lui sont associées et qui sont situées dans la zone de service.

Arc de service

Arc de l'orbite des satellites géostationnaires le long duquel la station spatiale pourrait assurer le service requis (le service requis dépend des caractéristiques du système et des besoins de l'usager) à toutes les stations terriennes qui lui sont associées et qui sont situées dans la zone de service.

Plan de l'orbite (d'un satellite)

Plan contenant le centre de gravité du corps principal et le vecteur vitesse d'un satellite, le système de référence étant le système spécifié pour définir les éléments de l'orbite.

Nœud ascendant (descendant)

Point où l'orbite d'un satellite ou d'une planète coupe le plan principal du système de référence, la troisième coordonnée du satellite ou de la planète étant croissante (décroissante) lors de son passage par ce point.

Orbite directe (rétrograde) (de satellite)

Orbite de satellite telle que la projection du centre de gravité du satellite sur le plan principal de référence tourne dans le même sens que le (tourne en sens inverse du) corps principal autour de son axe.

Inclinaison (d'une orbite de satellite)

Angle du plan de l'orbite d'un satellite et du plan principal de référence.

Note. – Par convention, l'inclinaison d'une orbite directe est un angle aigu et l'inclinaison d'une orbite rétrograde est un angle obtus.

Orbite circulaire (de satellite)

Orbite de satellite pour laquelle la distance des centres de gravité du satellite et du corps principal est constante.

Orbite elliptique (de satellite)

Orbite de satellite pour laquelle la distance des centres de gravité du satellite et du corps principal n'est pas constante, mais reste finie.

Note. – L'orbite non perturbée est une ellipse dans un système de référence dont l'origine est le centre de gravité du corps principal et dont les axes ont des directions fixes par rapport aux étoiles.

Orbite équatoriale (de satellite)

Orbite de satellite dont le plan coïncide avec celui de l'équateur du corps principal.

Orbite polaire (de satellite)

Orbite de satellite dont le plan contient l'axe des pôles du corps principal.

Orbite inclinée (de satellite)

Orbite de satellite qui n'est ni équatoriale ni polaire.

Apoastre

Point de l'orbite d'un satellite ou d'une planète situé à la distance maximale du centre de gravité du corps principal.

Périastre

Point de l'orbite d'un satellite ou d'une planète situé à la distance minimale du centre de gravité du corps principal.

Apogée

Point de l'orbite d'un satellite de la Terre situé à la distance maximale du centre de la Terre.

Note. – L'apogée est l'apoastre d'un satellite de la Terre.

Périgée

Point de l'orbite d'un satellite de la Terre situé à la distance minimale du centre de la Terre.

Note. – Le périgée est le périastre d'un satellite de la Terre.

Altitude de l'apogée (du périgée)

Altitude de l'apogée (du périgée) au-dessus d'une surface de référence spécifiée hypothétique servant à la représentation de la surface de la Terre.

Période de révolution (d'un satellite)
Période orbitale (d'un satellite)

Intervalle de temps compris entre deux passages consécutifs d'un satellite en un point caractéristique de son orbite.

Note. – Par convention, si le point caractéristique de l'orbite n'est pas spécifié, la période de révolution est la période anomalistique.

Période anomalistique

Intervalle de temps compris entre deux passages consécutifs d'un satellite à son périastre.

Période nodale

Intervalle de temps compris entre deux passages consécutifs d'un satellite par le nœud ascendant de son orbite.

Période de révolution sidérale (d'un satellite)

Intervalle de temps séparant deux intersections consécutives de la projection d'un satellite sur un plan de référence de direction fixe par rapport aux étoiles avec une demi-droite de ce plan issue du centre de gravité du corps principal et de direction également fixe par rapport aux étoiles.

Période de rotation sidérale (d'un corps spatial)

Période de rotation autour de son axe d'un corps spatial, repérée dans un système de référence fixe par rapport aux étoiles.

Satellite maintenu en position

Satellite dont la position du centre de gravité est astreinte à suivre une loi spécifiée, soit par rapport aux positions d'autres satellites appartenant au même système spatial soit par rapport à un point de la Terre fixe ou se déplaçant selon une loi connue.

Satellite synchronisé
Satellite en phase (déconseillé)

Satellite astreint à conserver une période anomalistique, ou une période nodale, égale à celle d'un autre satellite ou d'une planète, ou égale à la période d'un phénomène déterminé, et astreint à passer à des instants spécifiés en un point caractéristique de son orbite.

Satellite à commande d'orientation

Satellite dont au moins un axe est maintenu dans une direction spécifiée, par exemple la direction du centre de la Terre ou du Soleil, ou celle d'un point spécifié de l'espace.

Satellite synchrone

Satellite dont la période moyenne de révolution sidérale est égale à la période de rotation sidérale du corps principal autour de son axe. Par extension, satellite dont la période de révolution sidérale moyenne est approximativement égale à la période de rotation sidérale du corps principal autour de son axe.

Satellite géosynchrone

Satellite synchrone de la Terre.

Note. – La période de révolution sidérale de la Terre est d'environ 23 heures 56 minutes.

Satellite sous-synchrone (super-synchrone)

Satellite dont la période moyenne de révolution sidérale autour du corps principal est un sous-multiple (un multiple entier) de la période de rotation sidérale du corps principal autour de son axe.

Satellite stationnaire

Satellite qui reste fixe par rapport à la surface du corps principal; par extension, satellite qui reste approximativement fixe par rapport à la surface du corps principal.

Note. – Un satellite stationnaire est un satellite synchrone à orbite équatoriale, circulaire et directe.

Satellite géostationnaire

Satellite stationnaire pour lequel le corps principal est la Terre.

Orbite des satellites géostationnaires

Orbite unique de tous les satellites géostationnaires.

Réseau à satellite à réutilisation de fréquence

Réseau à satellite dont le satellite utilise plusieurs fois une bande de fréquence, grâce à une discrimination de polarisation ou à des faisceaux d'antennes multiples, ou à ces deux moyens à la fois.

SECTION 4B: FRÉQUENCES, ORBITES ET SYSTÈMES

Rapports

RAPPORT 205-4

FACTEURS AFFECTANT LE CHOIX DES FRÉQUENCES POUR LES TÉLÉCOMMUNICATIONS AVEC LES STATIONS SPATIALES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978)

1. Introduction

L'objet du présent Rapport est d'exposer brièvement les relations entre la fréquence et la propagation et d'étudier d'autres facteurs techniques qui influent sur les télécommunications spatiales, le but étant de définir une base pour le choix des fréquences devant servir aux télécommunications entre la Terre et une station spatiale du service fixe par satellite.

On n'y traite pas des facteurs affectant le partage des fréquences, cette question faisant l'objet d'autres Rapports.

Le § 2 ci-dessous étudie, en termes généraux, les caractéristiques de propagation et les paramètres de l'environnement relatifs aux télécommunications avec les stations spatiales, tandis que le § 3 traite de l'influence de la technologie de l'équipement. Les effets de propagation sont examinés plus en détail dans les textes de la Commission d'études 5 (notamment dans les Rapports 564, 719, 720 et 721) et dans ceux de la Commission d'études 6 (en particulier dans le Rapport 263); il y a lieu de se reporter à ces textes, selon les besoins.

2. Paramètres affectant les télécommunications avec les stations spatiales

Les systèmes du service fixe par satellite sont conçus pour fonctionner avec le minimum nécessaire de puissance d'émission, tant dans les stations terriennes que dans les stations spatiales, et cela pour les raisons suivantes:

- la puissance dont peuvent disposer les stations spatiales est jusqu'à présent limitée par les possibilités de la technique et par les restrictions imposées aux fusées de lancement;
- dans les bandes de fréquences partagées avec des services de Terre, la puissance des stations spatiales est limitée par des accords réglementaires;
- les brouillages entre systèmes de télécommunications spatiales et, dans les bandes partagées, les brouillages causés aux systèmes de Terre sont réduits si les puissances d'émission sont faibles.

Les systèmes doivent en même temps répondre aux exigences concernant le trafic et la qualité. Et, pour satisfaire à ces exigences, il faut tenir compte des effets de l'environnement et de la propagation, ainsi que du niveau de bruit dans les stations terriennes et les stations spatiales, éléments qui dépendent de la fréquence.

2.1 *Absorption atmosphérique*

Les caractéristiques d'affaiblissement de l'atmosphère «normale» sont liées à la fréquence; à certaines fréquences, l'énergie peut plus facilement qu'à d'autres traverser l'atmosphère; ces «fenêtres» radioélectriques sont les parties du spectre les plus utiles pour les télécommunications. Lorsqu'il s'agit de télécommunications spatiales, les gammes de fréquences les plus intéressantes sont principalement celles comprises entre la MUF ionosphérique (fréquence maximale utilisable par réflexion sur l'ionosphère) et la première raie d'absorption de l'oxygène (environ 60 GHz). D'autres «fenêtres» entre les raies d'absorption des gaz au-delà de 60 GHz pourraient aussi présenter un intérêt. Deux autres gammes, l'une inférieure à 300 kHz environ, l'autre située dans le spectre visible et infrarouge, présentent actuellement un intérêt beaucoup moins marqué pour les systèmes du service fixe par satellite.

La Fig. 1 représente, par rapport à l'affaiblissement dans le vide, l'affaiblissement théorique entre 1 et 300 GHz pour un trajet simple vertical dans une atmosphère sèche ou dans une atmosphère modérément humide (7,5 g/m^3 à la surface). On a admis, en l'occurrence, que l'atmosphère était «claire» (c'est-à-dire exempte d'hydrométéores). Avec cette hypothèse, l'affaiblissement (en dB) pour des angles de site arbitraires, tels que $5° \leqslant \theta \leqslant 90°$, peut être calculé approximativement, à partir des valeurs de l'affaiblissement pour des trajets verticaux, en multipliant celui-ci par le facteur cosec θ. Pour plus de détails, se référer au Rapport 719.

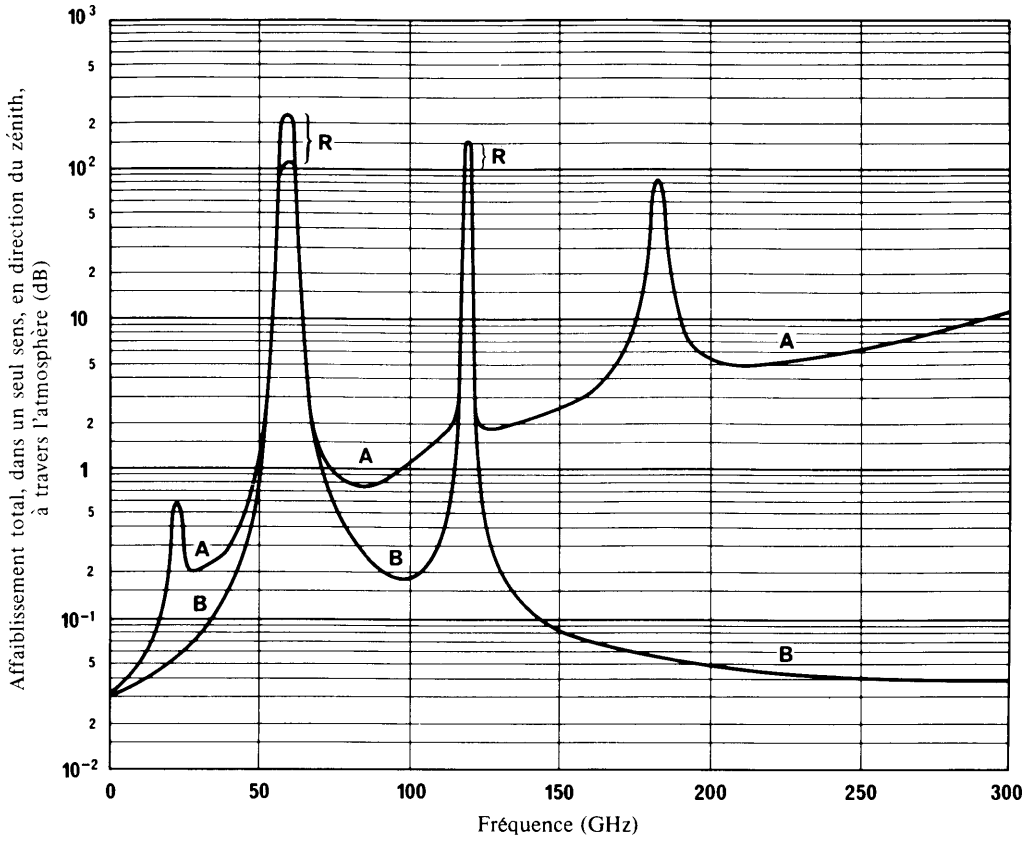


FIGURE 1 – *Affaiblissement total, dans un seul sens, en direction du zénith, à travers l'atmosphère, en fonction de la fréquence*

Courbes A : 7,5 g/m³ au sol
B : atmosphère sèche (0 g/m³)
R : gamme de valeurs (structure fine)

2.2 *Absorption par les hydrométéores*

En présence d'hydrométéores (pluie, grêle, neige, brouillard, nuages), l'affaiblissement atmosphérique croît avec la fréquence; l'affaiblissement dû aux hydrométéores – notamment aux fréquences supérieures à 10 GHz et pendant de petits pourcentages du temps – peut devenir le facteur limitatif dans le cas des systèmes conçus pour obtenir une haute fiabilité. De plus, sous l'effet d'un affaiblissement substantiel, la température de bruit du système de réception d'une station terrienne tend à augmenter et le rapport porteuse/bruit du signal reçu d'une station spatiale diminuera davantage que si sa dégradation ne résultait que de l'affaiblissement du signal. Les hydrométéores de grande densité sont généralement assez localisés pour que l'on puisse recourir aux techniques de réception en diversité qui, pour une qualité de service donnée, peuvent permettre de réduire la marge contre les évanouissements.

Pour plus de détails, notamment en ce qui concerne la variation des effets de l'affaiblissement en fonction de l'angle de site, il convient de se référer au Rapport 564 et au Rapport 721.

2.3 *Autres effets de propagation*

Les effets de propagation font intervenir un certain nombre d'autres facteurs, à savoir:

2.3.1 *Scintillation ionosphérique*

Aux fréquences inférieures à 1 GHz environ et, pour de petits angles de site, jusqu'à 7 GHz environ, la scintillation – c'est-à-dire les fluctuations d'amplitude et de phase dues aux hétérogénéités de l'indice de réfraction de l'ionosphère – donne lieu à une variation dans le temps du niveau du signal reçu, dont on doit tenir compte quand on fixe la marge contre les évanouissements lors de la conception du système. Des indications supplémentaires concernant la propagation ionosphérique figurent dans les textes de la Commission d'études 6 (en particulier dans le Rapport 263).

2.3.2 *Rotation de Faraday*

L'interaction des électrons libres de l'ionosphère et du champ magnétique terrestre donne lieu à une rotation du plan de polarisation d'une onde polarisée rectilignement, appelée «rotation de Faraday». La rotation du champ électrique due à l'effet Faraday varie selon la saison, l'heure du jour, l'activité solaire, la direction de l'onde incidente, l'état de l'ionosphère traversée par l'onde, la fréquence, etc. Elle peut atteindre occasionnellement une valeur de crête de 150° à 1 GHz, ce qui correspond à 9° à 4 GHz et à 4° à 6 GHz. Le sens de rotation de l'onde émise (6 GHz) est inverse de celui de l'onde reçue (4 GHz), aussi faut-il prévoir à la station terrienne une rotation différentielle du plan de polarisation pour 6 GHz par rapport à 4 GHz.

En revanche, l'influence de la rotation de Faraday est en principe négligeable aux fréquences supérieures à 10 GHz.

2.3.3 *Effets de dépolarisation*

Au-dessus de 1 GHz, les signaux peuvent être sujets à des effets de dépolarisation, qui augmentent généralement avec la fréquence, lorsque l'onde traverse un milieu diffusant tel que la pluie. Il en résulte une perte de discrimination entre deux signaux polarisés orthogonalement, qui peut être assez intense pendant de petits pourcentages du temps. Comme dans le cas de l'absorption en présence d'hydrométéores très denses, on peut faire appel aux techniques de réception en diversité pour surmonter ces effets.

2.3.4 *Effet Doppler*

Il se produit un glissement de fréquence par effet Doppler si la longueur d'un trajet de propagation radioélectrique varie dans le temps, la conséquence étant une variation continue de la phase. Pour un satellite à faible altitude, la variation relative de la fréquence reçue est au maximum de 2×10^{-5}. Il se peut aussi que l'on rencontre des difficultés secondaires du fait que le glissement de fréquence absolu n'est pas rigoureusement constant dans toute la bande de fréquences occupée par l'émission.

2.3.5 *Effets de propagation troposphérique*

Les effets de propagation dus aux phénomènes de scintillation et de réfraction troposphériques peuvent avoir des conséquences moins importantes, mais les constructeurs de systèmes pourront être amenés à en tenir compte. On trouvera des renseignements détaillés sur les phénomènes de propagation troposphérique dans les Rapports 564 et 718.

2.3.6 *Réfraction atmosphérique*

Pour l'étude des effets de la variation de la réfraction atmosphérique, se référer au § 2 du Rapport 718.

2.4 *Bruits*

Outre le bruit thermique engendré dans le récepteur d'une station terrienne ou d'une station spatiale, le bruit d'origine naturelle influe sur la réalisation concrète des systèmes.

C'est le bruit cosmique qui prédomine aux fréquences inférieures; il décroît au fur et à mesure que s'élève la fréquence. Aux fréquences supérieures, les éléments absorbants de l'atmosphère (vapeur d'eau, oxygène, hydrométéores) agissent comme des sources rayonnantes de bruit, et le niveau de bruit se trouve augmenté en conséquence. Ce bruit d'«absorption» est généralement exprimé sous forme d'une élévation de la température de bruit du système de réception, élévation que l'on peut calculer à l'aide des expressions données dans le Rapport 720.

Le bruit qui pénètre dans le système de réception d'une station terrienne par les lobes latéraux de l'antenne orientés vers la Terre ou dans le système de réception d'une station spatiale par le faisceau principal de l'antenne orienté vers la Terre, s'il est par essence indépendant de la fréquence, n'est est pas moins important.

Le Soleil est une puissante source de bruit, produisant une température de bruit qui atteint quelque 10^6 K à 30 MHz et dont la valeur minimale (pendant les périodes de «soleil calme») est de 10^4 K à 10 GHz. Le bruit d'origine solaire qui pénètre par le faisceau principal des antennes de station terrienne est cause d'interruptions temporaires dans la totalité de la gamme de fréquences considérée (voir le Rapport 390).

3. Technologie des équipements

En dehors des paramètres de la propagation et de l'environnement qui dépendent de la fréquence et qui affectent les communications avec les stations spatiales, il faut encore considérer deux éléments, eux aussi dépendants de la fréquence, qui jouent un rôle important dans le fonctionnement des systèmes: les gains des antennes des stations terriennes et des stations spatiales et l'excès de température de bruit des récepteurs.

4. Résumé

Jusqu'à présent, les télécommunications avec les stations spatiales du service fixe par satellite étaient faites dans les bandes de fréquences comprises entre les limites approximatives de 1 GHz et 10 GHz. On a autorisé récemment ce service à utiliser des bandes de fréquences plus élevées, et un certain nombre de programmes sont actuellement mis au point en vue d'exploiter ces nouvelles attributions de fréquences.

Les bandes de fréquences les plus intéressantes se situent entre deux limites qui ne sont pas encore parfaitement définies. La limite supérieure dépend principalement des conditions régnant dans la basse atmosphère. La limite inférieure, quant à elle, est influencée par les conditions ionosphériques et le niveau du bruit cosmique, de sorte qu'elle dépend plus étroitement de l'emplacement géographique, de l'horaire d'utilisation, des exigences de disponibilité du service et des servitudes imposées par la mise en œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

HAYDON, G. W. [mars-avril 1960] Optimum frequencies for outer space communication. *NBS J. Res.*, **64D**, 105-109.

PERLMAN, S., KELLEY, L. C., RUSSELL, W. T. Jr. et STUART, W. D. [septembre 1959] Concerning optimum frequencies for space communication. *Proc. IRE*, CS-7, 167.

RAWER, K. [1962] Propagation problems with space radiocommunication. *NBS J. Res.*, Section D.

Rapports du CCIR

453-2; 214-3.

RAPPORT 206-4

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES RELATIVES AU CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ORBITE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1963-1966-1970-1974-1982)

1. Introduction

On a proposé différentes orbites pour le service fixe par satellite; le but du présent Rapport est de classer les divers types d'orbites du point de vue technique et d'examiner ceux qui semblent le plus souhaitables du point de vue de l'exploitation.

On remarquera que le développement des systèmes du service fixe par satellite étant nécessairement un processus évolutif et toutes les exigences de transmission et d'exploitation ne pouvant pas être remplies par un type de système unique, plus d'un système ou plus d'un type de système pourra finalement faire partie du réseau mondial de télécommunication. De manière générale, les systèmes du service fixe par satellite se caractérisent par deux propriétés qui tiennent à la géométrie de leur trajet de transmission: d'une part, la propagation entre une station spatiale et une station terrienne associée se fait en visibilité directe; d'autre part, toutes les stations terriennes directement visibles d'une station spatiale peuvent communiquer entre elles par l'intermédiaire de la station spatiale. Les sujets relatifs aux possibilités de brouillage résultant de cette géométrie entre stations terriennes, stations spatiales et, dans les bandes de fréquences partagées, stations de Terre, sont traités en détail dans les Rapports de la Commission d'études 4 et, parfois, de la Commission d'études 9.

2. Types d'orbites pour les systèmes du service fixe par satellite

Les orbites possibles des stations spatiales comprennent notamment des orbites circulaires et des orbites elliptiques, dont le plan peut coïncider ou non avec celui de l'équateur terrestre. Les plus intéressantes actuellement sont les orbites à apogée de grande altitude et à période de révolution relativement longue, en particulier l'orbite des satellites géostationnaires ainsi qu'une orbite d'une période de révolution de 12 heures, très elliptique et inclinée à quelque 65°. Ces orbites assurent une vaste couverture géographique pendant les 24 heures de la journée, la première avec une géométrie fixe et en principe invariable, la seconde sur la base d'un «relais» périodiquement assuré entre les stations spatiales successives par un système d'antennes multiples dont sont équipées les stations terriennes associées.

De plus, des orbites à altitude moyenne peuvent présenter un intérêt pour certaines applications. Les caractéristiques de ces orbites sont décrites dans la littérature technique [Dalgleish et Jefferis, 1965; Lutz et Dorosheski, 1966; Jensen et autres, 1962; Haviland et House, 1965].

Pour un système donné, le type de l'orbite et celui de la station spatiale, de même que la construction propre à la station terrienne, sont dictés par les exigences du trafic (nature, volume, commutation à assurer, zone à desservir) et par des considérations opérationnelles (fiabilité, possibilité de rétablissement et souplesse des moyens de réacheminement du trafic).

2.1 *Systèmes à stations spatiales géostationnaires*

C'est à l'invariabilité de leur géométrie par rapport à la ou aux zones terrestres qu'ils desservent que les systèmes à stations spatiales géostationnaires doivent la préférence très nette dont ils sont l'objet. Les avantages inhérents à leur géométrie sont les suivants:

- visibilité constante et invariable à partir de tous les points de la ou des zones terrestres qu'ils desservent;
- minimum d'exigences imposées à l'exploitation et la construction des stations terriennes associées;
- invariance des paramètres de transmission et des paramètres de construction des stations spatiales, en particulier, emploi par ces stations de systèmes d'antennes fixes et à faisceau étroit;
- possibilité d'une zone de couverture presque maximale de la surface terrestre (voir la Fig. 1);
- caractéristiques presque constantes des brouillages prévisibles entre systèmes utilisant les mêmes fréquences.

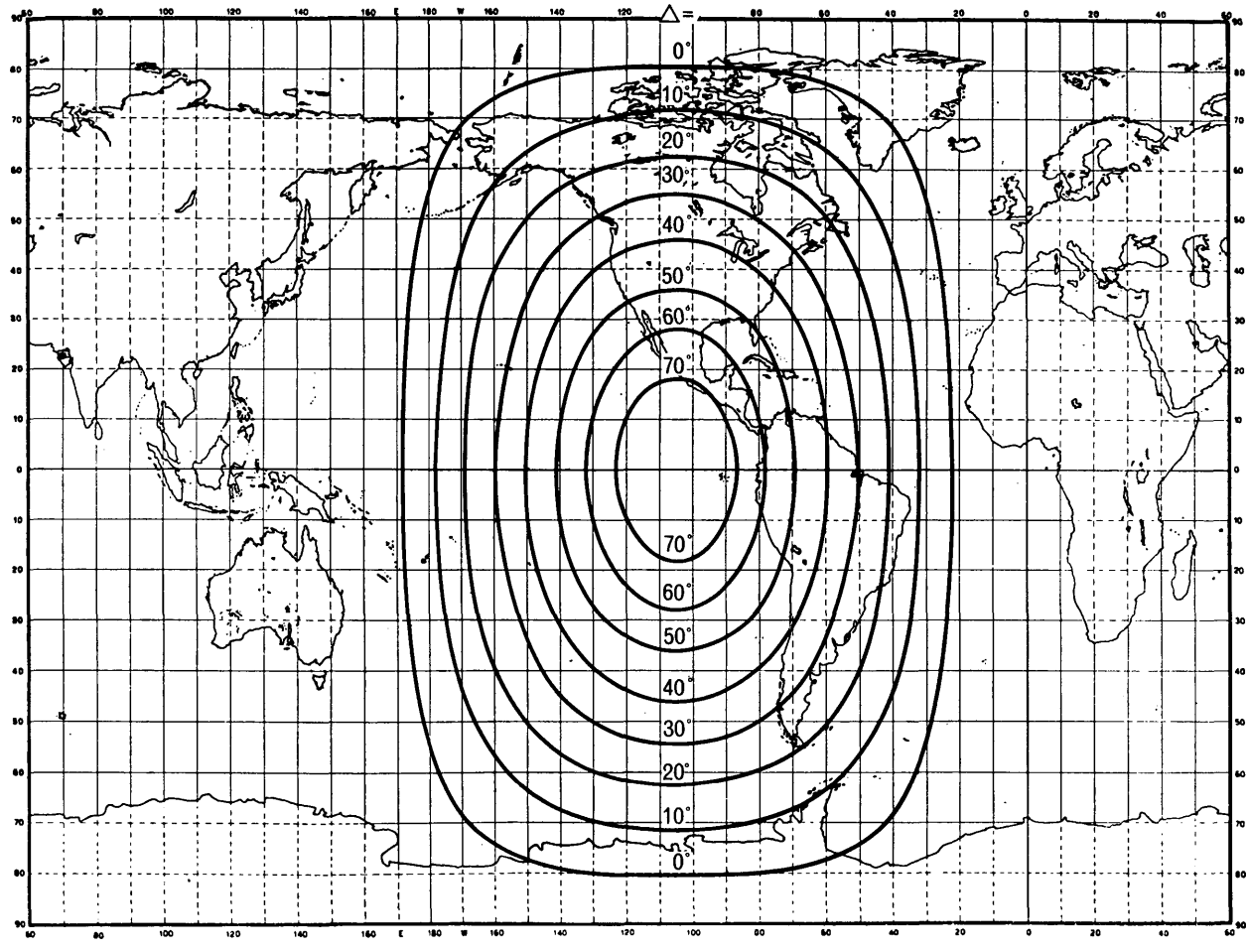


FIGURE 1 — *Carte donnant un exemple de zone de couverture pour un satellite géostationnaire (avec l'angle de site Δ comme paramètre)*

Les orbites sont toutefois caractérisées par un temps de propagation aller et retour relativement long: 0,6 seconde (voir le Rapport 383); de plus, les signaux que devraient recevoir les stations terriennes sont masqués, d'une façon périodique et prévisible, lors des conjonctions du Soleil.

Des études ont montré que, pour une zone de couverture et dans une bande de fréquences données, l'orbite des satellites géostationnaires ne possède qu'une capacité de télécommunication limitée, car le nombre des stations spatiales qu'elle peut contenir sans risque de brouillages inadmissibles est limité. On a prêté à cette question une attention particulière (Programme d'études 2J/4 et textes connexes). Parmi les techniques envisagées pour éviter la saturation de l'orbite des satellites géostationnaires, citons l'emploi de stations spatiales géosynchrones sur orbites légèrement inclinées et peut-être elliptiques, ce qui permettrait de loger, sur chaque «emplacement» de l'orbite, plusieurs stations spatiales «quasi stationnaires» exploitées sur la base d'accords relatifs aux brouillages (voir le Rapport 453).

2.2 *Systèmes à stations spatiales en phase et non géostationnaires*

Les systèmes avec satellites en phase, notamment ceux à trajectoires fermées par rapport à la Terre, c'est-à-dire récurrentes, peuvent être conçus pour l'utilisation d'un nombre de satellites réduit. (Une orbite est dite fermée par rapport à la Terre lorsque sa projection sur la Terre reste la même d'un jour au lendemain; il peut s'agir d'une orbite équatoriale ou d'une orbite sous-synchrone inclinée.) Pour les communications avec les stations terriennes situées dans les régions polaires, il se peut qu'il y ait avantage à utiliser des orbites inclinées plutôt que des orbites équatoriales et un satellite géostationnaire. Toutefois, chaque station terrienne doit être équipée d'un plus grand nombre d'antennes que dans un système à satellite géostationnaire, si l'on veut assurer un service continu.

Comme exemple de ces systèmes, citons les systèmes à orbite sous-synchrone de 12 heures et de 8 heures. Dans ces systèmes, chaque satellite serait visible de chaque station terrienne une ou deux fois par jour et la couverture mondiale serait réalisée avec environ six zones se chevauchant en partie, chacune de celles-ci s'étendant sur quelques heures du temps local. Dans une zone donnée, toutes les stations pourraient utiliser simultanément le même satellite et être en relation les unes avec les autres par un seul bond.

Les systèmes dont il s'agit ont une autre caractéristique propre, qui pourrait se révéler extrêmement avantageuse, à savoir une certaine redondance en satellites. En cas de défaillance d'un satellite, on pourrait utiliser les satellites adjacents dans une portion normalement inactive de leur orbite, pour maintenir en service de nombreux circuits qui, autrement, auraient été interrompus.

Parmi les systèmes possibles utilisant plusieurs stations spatiales en phase, l'un, particulièrement prometteur, a déjà été mis en œuvre: orbite très elliptique inclinée à 65° environ et à période de révolution de 12 heures. Cette orbite s'est révélée la meilleure pour desservir des stations terriennes situées jusqu'aux latitudes polaires, chose dont les satellites géostationnaires ne sont pas capables.

L'apogée de cette orbite est à peu près à la même altitude que l'orbite des satellites géostationnaires (environ 40 000 km); la vitesse angulaire d'une station spatiale est faible au voisinage de l'apogée, ce qui permet à chacune des stations spatiales d'être visible de la zone de service pendant la plus grande partie de sa période orbitale; si plusieurs de ces stations sont correctement mises en phase sur l'orbite, la zone desservie par le système n'est guère moins étendue que celle d'une station spatiale géostationnaire. Si l'apogée est proche du point de l'orbite de latitude maximale (environ 65°), la zone de service du système couvrira des régions très voisines du pôle et, pour une orbite inclinée à 65° environ, l'apogée ne tourne pas dans le plan de l'orbite, comme il le ferait pour d'autres valeurs de l'inclinaison.

Pour qu'un système utilisant une telle orbite puisse assurer un service ininterrompu, il faut que les stations terriennes associées soient munies des installations leur permettant de passer d'une station spatiale à la suivante.

3. Interruptions prévisibles dans le service fixe par satellite

Dans les systèmes du service fixe par satellite, le service peut subir des interruptions dans diverses conditions. Il y aura interruption prévisible, dans un système «aléatoire», chaque fois que deux stations terriennes en communication ne trouveront pas simultanément dans leur champ de visibilité le satellite nécessaire au maintien de la liaison. Il ne s'agit cependant pas là d'une caractéristique des systèmes décrits dans le § 2. Des interruptions prévisibles peuvent ainsi se produire en cas d'éclipse solaire, mais seulement si les batteries ne suffisent pas à assurer l'alimentation pendant ces périodes. Certains des premiers satellites ne comportaient pas de telles batteries; toutefois, dans la pratique actuelle, on prévoit une réserve suffisante pour faire face aux éclipses. Avec les satellites géostationnaires, des éclipses se produisent pendant deux périodes (d'environ 40 jours chacune) centrées autour des équinoxes. Au cours de chaque période, la durée des éclipses croît de quelques minutes pour atteindre un maximum de 70 min et décroître ensuite jusqu'à redevenir nulle. Les éclipses se produisent autour de minuit (heure locale de la projection du satellite sur la Terre). Cette heure correspond à un trafic peu intense en ce point, mais un satellite donné peut être en train de relayer le trafic entre des stations terriennes situées à l'ouest (20 heures locales, par exemple), là où le trafic, sans atteindre son intensité maximale, peut être encore assez dense.

Dans certains systèmes, le trafic peut être interrompu lorsque le Soleil (voir le Rapport 390) traverse le faisceau de l'antenne de la station terrienne. La durée et l'intensité du brouillage dépendent de l'ouverture de ce faisceau, de la proximité du trajet du Soleil par rapport au centre du faisceau et de l'emplacement de la station terrienne. On peut s'attendre à des brouillages pendant quelques jours lors de chaque période d'équinoxe.

Les brouillages d'origine solaire observés jusqu'ici dans le cas des satellites géostationnaires avec antennes de grandes dimensions (20 à 25 m) se limitent à un maximum d'environ quatre jours par an. Ils se traduisent par un niveau de bruit élevé ou, dans les conditions les plus défavorables, par une interruption complète du trafic. Les périodes les plus longues pendant lesquelles on a observé un niveau de bruit élevé et une interruption totale ont duré respectivement environ 15 et 7 min. Les techniques permettant d'éviter les interruptions de transit solaire, par commutation des liaisons de communication entre les satellites, sont discutées dans l'ouvrage qui fait l'objet de la référence «Wadsworth» dans le Rapport 453.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DALGLEISH, D. I. et JEFFERIS, A. K. [janvier 1965] Some orbits for communication-satellite systems affording multiple access. *Proc. IEE*, Vol. 112, **21**, 21-30.

HAVILAND, R. P. et HOUSE, C. M. [1965] *Handbook of Satellites and Space Vehicles.* D. Van Nostrand Co., Pays-Bas.

JENSEN, J., TOWNSEND, G., KORK, J. et KRAFT, D. [1962] *Design Guide to Orbital Flights.* McGraw-Hill Book Co., Inc., NY, Etats-Unis d'Amérique.

LUTZ, S. G. et DOROSHESKI, G. [septembre 1966] Coverage and overlap of satellites in circular equatorial orbits, with applications to multiple-access communication-satellite systems. *Proc. IEE*, Vol. 113, **9**, 1495-1503.

RAPPORT 207-5

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION PAR SATELLITES, EXPÉRIMENTAUX ET EN EXPLOITATION, DE TYPES COURANTS

(Question 2/4)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

La première phase des essais effectués avec les satellites de télécommunication est achevée; les transmissions du trafic commercial par satellites de télécommunication ont commencé en 1965.

Le présent Rapport contient des références aux satellites expérimentaux de télécommunication lancés avant janvier 1965, ainsi que des renseignements plus détaillés sur quelques systèmes de satellites de type courant adoptés par la suite.

2. Premiers projets de satellites

Les expériences sur des satellites actifs de télécommunication, antérieures à janvier 1965, furent SCORE [Brown et Senn, 1960], COURIER [Ratcliffe, 1961], TELSTAR [Dickieson, 1963], RELAY [Abramson et Brady, 1962; Schreiner, 1963] et SYNCOM [Gatland, 1964].

3. Système INTELSAT

3.1 *Généralités*

Le premier satellite, INTELSAT-I, a été lancé en 1965 dans le cadre d'un programme de liaisons commerciales. Ce programme fut couronné de succès et permit des transmissions téléphoniques multivoies et de télévision, monochrome et en couleur.

Le premier satellite de la série Intelsat-II a été lancé en janvier 1967. Plusieurs stations spatiales de ce type ont été ensuite mises en exploitation commerciale et ont servi pendant assez longtemps de moyen de complément aux satellites de la série Intelsat-III. A l'heure actuelle, aucune d'elles n'assure plus de service commercial.

Le premier satellite de la série Intelsat-III a été mis en service en janvier 1969. Des stations spatiales du même type ont été ensuite mises sur orbite afin de desservir les régions de l'océan Atlantique, de l'océan Pacifique; au début, leur service était complété par des stations spatiales opérationnelles du type Intelsat-II. Cette série a été remplacée par une nouvelle série d'engins spatiaux.

La série de satellites Intelsat-IV a été mise en service pour la première fois en mars 1971 pour desservir les trois régions océaniques. En 1982, seuls deux de ces engins spatiaux étaient toujours en service.

Le premier satellite Intelsat-IV-A, lancé en 1975, a commencé d'être exploité comme satellite principal dans la Région de l'océan Atlantique en février 1976. Au milieu de 1982, plusieurs de ces engins spatiaux ont été remplacés par des satellites Intelsat-V.

Avec le premier satellite Intelsat-V, lancé en décembre 1980, débutera, dans le système INTELSAT, l'exploitation d'une nouvelle bande de fréquences à 14/11 GHz. Jusqu'à ce jour, le système INTELSAT exploitait exclusivement la bande 6/4 GHz. Certains modèles de la série Intelsat-V seront aussi équipés d'un sous-système de communications maritimes dans la bande L (MCS). Il est prévu d'en effectuer le lancement vers la fin de 1982. Un satellite Intelsat-V de capacité quelque peu supérieure, le satellite INTELSAT-V-A, sera lancé au début de 1984. La série Intelsat-V-A est dotée de faisceaux étroits à p.i.r.e. élevée, destinés à être utilisés avec des répéteurs loués desservant des réseaux nationaux.

Une nouvelle génération de satellites de grande capacité, les satellites Intelsat-VI, est actuellement en cours de mise au point et le premier lancement est prévu pour 1986. Cette série de satellites sera exploitée dans les bandes 6/4 GHz et 14/11 GHz et elle fournira environ 34 000 circuits, un système SPADE et deux voies de télévision lorsqu'elle sera utilisée pour les satellites principaux de la région de l'océan Atlantique. On parviendra à ce résultat en appliquant 6 fois la réutilisation des fréquences et en utilisant le système AMRT.

3.2 *Les satellites*

Tous les satellites sont sur orbite géostationnaire, à une altitude de 35 800 km. On trouvera au Tableau I des données relatives à certains de ces satellites.

TABLEAU I — *Données relatives aux satelllites INTELSAT*

Caractéristiques	INTELSAT								
	I	II	III	IV	IV-A	V	V-MCS	V-A	VI
Masse (kg) en orbite	39	83	127	700	828	1053	1092	1088	–
Dimensions (cm): diamètre	73	142	142	240	240	–	–	–	–
hauteur	59	67	104	530	698	640	640	640	–
longueur	–	–	–	–	–	1590	1590	1590	–
Nombre de répéteurs	2	1	2	12	20	27	29	32	46
Largeur de bande des répéteurs (MHz)	25	125	225	40	40	40, 80, 240	7,5, 40, 80, 240	40, 80, 240	40, 80, 150
Largeur totale de la bande utilisée (MHz)	50	125	450	480	800(2)	2300(3)	2315(3)	2500(3)	3460(4)
p.i.r.e. totale (dBW)	13	15,5	25,8	23/37(1)	23/29(1)	23/44(1)	23/44(1)	23/44(1)	26/44(1)
Bandes de fréquences (GHz)	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4	6/4, 14/11	1,6/1,4, 6/4, 14/11	6/4, 14/11	6/4, 14/11
Polarisation	rectiligne	rectiligne	rectiligne	rectiligne	rectiligne	circulaire(5) /rectiligne	circulaire(5) /rectiligne	circulaire(5) /rectiligne	circulaire(5) /rectiligne
Premier lancement de la série	6.4.65	11.1.67	18.12.68	26.3.71	25.9.75	6.12.80	fin 1982	1984	1986

(1) Ces valeurs s'entendent respectivement pour une antenne d'émission à faisceau étroit. Elles se rapportent à la puissance dans l'axe du lobe principal, chaque répéteur étant saturé et rayonnant une seule onde porteuse.

(2) Fréquences à 6/4 GHz réutilisées deux fois.

(3) Fréquences à 6/4 GHz réutilisées quatre fois; deux fois à 14/11 GHz.

(4) Fréquences à 6/4 GHz réutilisées six fois; deux fois à 14/11 GHz.

(5) Circulaire à 6/4 GHz en rectiligne à 14/11 GHz.

3.3 *Les stations terriennes*

Le nombre des stations terriennes, peu élevé au début, s'est considérablement accru. Il y en a en service sur tous les continents. Au début de 1982, le réseau de stations terriennes ayant accès aux satellites Intelsat comprenait 405 antennes pour 315 stations terriennes réparties entre 106 pays.

Il existe trois types normalisés de stations terriennes destinées à l'écoulement du trafic international au moyen des satellites Intelsat:

- Norme A, 6/4 GHz, 30-32 m;
- Norme B, 6/4 GHz, 11-13 m;
- Norme C, 14/11 GHz, 16-18 m.

Outre ces antennes normalisées, il existe de nombreuses antennes qui ont accès aux répéteurs de satellite Intelsat et qui ont été louées pour des services nationaux. Ces antennes de stations terriennes ont des diamètres qui s'échelonnent entre 4,5 et 15 mètres.

4. Systèmes à satellites MOLNIYA, ORBITA et RADOUGA

4.1 *Système MOLNIYA-I*

Le premier satellite MOLNIYA-I, lancé le 23 avril 1965 et placé sur une orbite elliptique, était destiné à assurer des services de télévision, de téléphonie et de phototélégraphie.

Les caractéristiques techniques de l'engin spatial et de ses stations terriennes figurent respectivement aux Tableaux II et III.

4.2 *Réseau de distribution ORBITA*

Le tableau de distribution ORBITA est utilisé pour la transmission de programmes émanant d'un centre de télévision. Il se compose d'une station d'émission située dans les environs de Moscou et d'un grand nombre de stations de réception situées à des distances comprises entre 3000 et 7000 km et réparties sur tout le territoire de l'Union Soviétique. La transmission du signal son est assurée au moyen d'un système spécial de modulation d'impulsions en durée à l'intérieur des limites du palier arrière des impulsions de suppression ligne. Le réseau ORBITA permet de transmettre des programmes de télévision en couleur SECAM et le signal son correspondant au moyen du procédé décrit ci-dessus, de même que des pages de la presse écrite et des émissions de radiodiffusion sonore, soit en remplacement du signal de télévision soit en même temps que celui-ci.

Les caractéristiques du satellite MOLNIYA-I utilisé dans le réseau ORBITA sont données au Tableau II. Les caractéristiques des stations terriennes correspondantes se trouvent dans le Tableau III.

4.3 *Système MOLNIYA-II*

Le système à satellites MOLNIYA-II fonctionne régulièrement dans les bandes des 4 et 6 GHz.

Le premier satellite du système a été placé en 1971 sur une orbite elliptique pour assurer la distribution, au réseau ORBITA-2, de programmes de télévision monochrome et en couleur et la transmission de programmes de radiodiffusion sonore; il assure aussi des transmissions téléphoniques multivoies, selon le mode d'accès multiple, ainsi que d'autres types de transmission de messages pour l'ensemble de l'U.R.S.S. Les indices de qualité du système sont conformes aux spécifications des Avis appropriés du CCIR.

Les caractéristiques des satellites MOLNIYA-II figurent dans le Tableau II et celles des stations terriennes dans le Tableau III.

TABLEAU II — *Caractéristiques des satellites*

Caractéristiques	Satellite				
	MOLNIYA-I	MOLNIYA-II	MOLNIYA-III	RADOUGA	STATSIONAR-T
Orbite:	Elliptique	Elliptique	Elliptique	Géostationnaire	Géostationnaire
– inclination (degrés)	65	63	63	—	—
– apogée (km)	40 000 (1)	40 000 (1)	40 000 (1)	35 800	35 800
– périgée (km)	500 (2)	500 (2)	500 (2)	35 800	35 800
Période (h)	12	12	12	24	24
Bande de fréquences (MHz)					
– de l'émetteur	3700-3900	3400-3844	3650-3900	3400-3900	
– du récepteur	6025-6225	5725-5987	5975-6225	5725-6225	6188-6212
Puissance de crête totale (W)	—	7	30	9,5	
Gain d'antenne maximale (dB)	18	17	17,3	23	
Température de bruit de la station spatiale de réception (K)	3000	3000	3000	3000	3000

(1) Au-dessus de l'hémisphère Nord.

(2) Au-dessus de l'hémisphère Sud.

TABLEAU III — *Caractéristiques des stations terriennes*

Puissance de crête totale (kW)	2 à 6
Gain d'antenne (dB)	
– émission	54,8
– réception	51,9
Température de bruit du système (K)	100

4.4 *Système international de télécommunications par satellite INTERSPOUTNIK*

Le système international de télécommunications par satellite INTERSPOUTNIK est destiné aux communications téléphoniques, télégraphiques et phototélégraphiques ainsi qu'à l'échange de programmes de télévision et de radiodiffusion entre les pays participants. Ce système a été établi en 1971 conformément à un accord intergouvernemental entre les pays socialistes: République populaire de Bulgarie, République populaire hongroise, République démocratique allemande, Cuba, République populaire de Mongolie, République populaire de Pologne, République socialiste de Roumanie, U.R.S.S. et République socialiste de Tchécoslovaquie.

A l'heure actuelle, l'organisation INTERSPOUTNIK loue des répéteurs dans un satellite appartenant à l'U.R.S.S.

Pour l'émission de programmes de télévision en couleur (norme SECAM-IIIB), on utilise la modulation de fréquence. Les signaux son qui accompagnent l'image de télévision sont émis selon deux méthodes différentes MRT et MRF. Avec le multiplexage par répartition dans le temps, les signaux d'accompagnement sonore sont transformés en une séquence d'impulsions modulées en durée et insérées dans les intervalles de suppression de ligne. Avec le multiplexage par répartition en fréquence du canal de télévision, le signal son est émis au moyen d'une sous-porteuse modulée en fréquence, située au-dessus du spectre du signal de télévision (7,5 MHz).

La transmission de communications téléphoniques dans le système INTERSPOUTNIK s'effectue par modulation de fréquence de plusieurs porteuses, chaque porteuse étant modulée par le signal d'une voie téléphonique.

Les systèmes de pointage des stations INTERSPOUTNIK donnent trois possibilités de fonctionnement: pointage programmé, poursuite automatique (sur un signal d'information à large bande) et correction automatique du programme.

Dans le système INTERSPOUTNIK, on utilise des satellites du type MOLNIYA-III, dont les caractéristiques sont indiquées au Tableau II; les caractéristiques des stations terriennes figurent au Tableau III.

Le système international de télécommunications par satellite INTERSPOUTNIK est en exploitation régulière depuis le mois de novembre 1973, après l'entrée en service des stations terriennes de l'U.R.S.S. et de Cuba. En 1977, le système comprend six stations; quelques nouvelles stations sont en construction.

Les indices de qualité des voies téléphoniques et des canaux de télévision sont conformes aux dispositions des Avis du CCIR et du CCITT.

4.5 *Système à satellite RADOUGA*

Le 29 décembre 1975, selon le programme prévu, l'Union Soviétique a placé sur l'orbite des satellites géostationnaires le premier satellite de la série STATSIONAR, appelé RADOUGA. Ce satellite est prévu pour les catégories de trafic suivantes: communications téléphoniques, télégraphiques et phototélégraphiques sur le territoire de l'Union Soviétique, transmission de programmes de télévision en noir et blanc et en couleur, radiodiffusion et transmission de pages de journaux.

Le lancement du deuxième satellite de la série STATSIONAR a été effectué le 11 septembre 1976.

Sur le trajet Terre-satellite, on utilise une fréquence de la bande des 6 GHz et, sur le trajet satellite-Terre, une fréquence de la bande des 4 GHz.

Les caractéristiques du RADOUGA figurent au Tableau II et celles des stations terriennes au Tableau III.

Le système de télécommunications utilisant le satellite RADOUGA est en exploitation régulière depuis le mois d'août 1976. Un grand nombre de stations fonctionnent dans le système et de nombreuses autres doivent encore être mises en service.

L'un des canaux du satellite RADOUGA sert à la transmission de programmes de télévision en couleur et en noir et blanc, pour laquelle on utilise la modulation de fréquence. Les signaux d'accompagnement sonore sont émis de deux manières différentes: multiplexage par répartition dans le temps (MRT) et multiplexage par répartition en fréquence (MRF) du canal de télévision.

Les autres canaux du satellite servent aux communications téléphoniques, télégraphiques et phototélégraphiques. Certains des canaux sont conçus pour l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) et d'autres pour l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF).

Les indices de qualité des voies téléphoniques et des canaux de télévision sont conformes aux dispositions des Avis du CCIR et du CCITT.

Les canaux avec AMRF sont utilisés pour transmettre des groupes de plusieurs voies en modulation de fréquence, ainsi que des voies téléphoniques individuelles, ce qui permet de répartir rationnellement les voies entre les stations terriennes en fonction des variations de la densité du trafic au cours de la journée.

Dans les canaux avec AMRT, outre des groupes de plusieurs voies téléphoniques, on transmet un grand nombre de programmes de radiodiffusion que reçoivent des stations terriennes du système, équipées spécialement.

4.6 *Système à satellite STATSIONAR-T*

Le satellite STATSIONAR-T a été placé par l'U.R.S.S. sur l'orbite des satellites géostationnaires le 26 octobre 1976 en un point de longitude 99° E et de latitude 0° N. Une station terrienne d'émission située à Gus-Khzustalny transmet les programmes au satellite, dans la bande des 6 GHz du service fixe par satellite (Tableau II) [CCIR, 1974-78].

5. Système à satellite TELESAT

Le système TELESAT est un système national canadien qui a été mis en service en 1973 pour assurer la transmission de programmes de télévision, de radiodiffusion et de messages sur tout le territoire du Canada. En 1977, le système a en service trois satellites ANIK et 76 stations terriennes fonctionnant dans les bandes des 4 et 6 GHz. Chacun des deux satellites en exploitation peut transmettre jusqu'à 12 canaux radioélectriques. Dans le mode d'exploitation avec accès simple, chaque canal radioélectrique peut transmettre soit un signal de télévision en couleur NTSC avec deux signaux son et un signal d'ordre et de commande du réseau, soit une porteuse MRF-MF d'une capacité jusqu'à 960 voies téléphoniques.

Dans le mode d'exploitation avec accès multiple et répartition en fréquence, les porteuses ont une capacité de 1 à 120 voies téléphoniques, en modulation analogique ou numérique.

Les caractéristiques globales du satellite ANIK-A figurent au Tableau IV et celles des stations terriennes au Tableau V.

TABLEAU IV — *Caractéristiques du satellite ANIK-A*

Orbite	géostationnaire
Maintien en position par rapport à la position nominale (inclinaison et longitude)	$\leqslant 0{,}1°$
Nombre de canaux radioélectriques	12
Largeur de bande des canaux radioélectriques	36 MHz
p.i.r.e. par canal radioélectrique (maximum)	36 dBW
Polarisation	rectiligne
Diamètre de l'engin spatial	1,9 m
Hauteur de l'engin spatial	3,5 m
Antenne	couverture du territoire canadien: diagramme elliptique, ouverture nominale $3° \times 8{,}5°$

TABLEAU V — *Caractéristiques des stations terriennes du système TELESAT*

Puissance de sortie de l'émetteur	5 W à 3 kW
Diamètres des antennes	4,5 - 8 - 10 - 30 m
Température de bruit du système	125 K à 450 K

6. Projet des satellites d'applications technologiques

6.1 *Les satellites*

Le programme des satellites d'applications technologiques (ATS – «Applications Technology Satellite») comprend six satellites. L'ATS-1 et l'ATS-3, lancés le 6 décembre 1966 et le 5 novembre 1967 respectivement, sont des engins spatiaux à stabilisation gyroscopique placés sur des orbites géostationnaires. L'ATS-1 utilise des antennes à commande électronique de rotation antagoniste aussi bien pour les répondeurs fonctionnant en ondes

centimétriques (6 et 4 GHz) que pour les répondeurs à ondes métriques (135 et 148 MHz), alors que l'ATS-3 utilise une antenne à commande mécanique pour les ondes centimétriques et une antenne à commande électronique pour les ondes métriques. L'ATS-2 est un satellite stabilisé en gradient de pesanteur, conçu pour une orbite circulaire inclinée (11 000 km, 28°). Toutefois, par suite d'une défaillance de la fusée de lancement, l'ATS-2 a été placé sur une orbite elliptique (périgée: 185 km; apogée: 11 000 km).

Les satellites ATS-4, ATS-5 et ATS-6 sont stabilisés en gradient de pesanteur et ont été conçus pour des orbites géostationnaires. L'ATS-4, lancé le 20 juillet 1968, a été placé sur une orbite elliptique inclinée, en raison d'une défaillance de la fusée de lancement. Le satellite ATS-5, lancé en 1969, a été placé sur l'orbite des satellites géostationnaires et soumis à des expériences préliminaires sur la propagation à 15,3 et à 31,65 GHz, ainsi que sur les communications à 4 et 6 GHz. Le satellite ATS-6, lancé en 1974, est stabilisé sur les trois axes et équipé d'une antenne déployable de 10 mètres. Il est conçu pour permettre non seulement des communications à 4 et 6 GHz, mais aussi pour établir des liaisons montantes à 148 MHz, 1650 MHz et 2250 MHz, et descendantes à 136 MHz, 1550 MHz, 2025 MHz, 2570 MHz et 2656 MHz. Des expériences de propagation ont eu lieu avec les fréquences 20,15 GHz et 30,15 GHz pour la liaison descendante, en utilisant la liaison montante à 6 GHz. D'autres expériences ont été effectuées avec les fréquences 13 GHz et 18 GHz pour la liaison montante, en utilisant la liaison descendante à 4 GHz.

6.2 *Les stations terriennes*

Trois stations terriennes assurent le support principal des missions des satellites d'applications technologiques. Elles sont situées à Rosman (Caroline du Nord), Goldstone (Californie), aux Etats-Unis d'Amérique, et à Cooby Creek (Australie). Les caractéristiques les plus importantes des trois stations principales sont indiquées dans le Tableau VI. Le programme est également utilisé par la station du Laboratoire de recherches radioélectriques de Kashima (Japon) et à la station du département de l'Energie atomique d'Ahmedabad (Inde). Des équipements terminaux spéciaux de communication permettant l'accès aux équipements de télévision du satellite ATS-6 ont également été construits au Colorado, dans l'Etat d'Utah, en Inde ainsi qu'au Brésil. Pour les expériences de télécommunications à 20 et 30 GHz, on a utilisé aux Etats-Unis d'Amérique et en Europe des stations terriennes avec antennes de 3 à 9 m de diamètre.

TABLEAU VI — *Stations terriennes utilisées*

	Rosman	Goldstone	Cooby Creek
Type d'antenne	Réflecteur parabolique	Réflecteur parabolique	Réflecteur parabolique
Diamètre	26 m	12 m	12 m
Type d'alimentation	Cassegrain ou foyer principal	Cassegrain	Cassegrain
Montage	X-Y	X-Y	Az-El

6.3 *Résumé des essais*

En 1977, les satellites ATS-1, ATS-3 et ATS-6 sont encore largement utilisés. Ils sont tous employés dans des expériences de télécommunications; le satellite ATS-1 a servi à des expériences de communications par satellite dans la bande des ondes décimétriques, avec des émetteurs-récepteurs de prix modique utilisant des antennes fouet dans des endroits écartés. Le satellite ATS-6 a été utilisé dans le cadre de l'expérience de communications maritimes intéressant le système MARISAT et d'un système expérimental de télévision éducative dans les Etats des Montagnes rocheuses des Etats-Unis d'Amérique, ainsi qu'en Inde et au Brésil.

7. Système SYMPHONIE

Le système expérimental franco-allemand SYMPHONIE est constitué de deux satellites SY-1 et SY-2, placés sur l'orbite des satellites géostationnaires respectivement les 19 décembre 1974 et 27 août 1975; ces satellites fonctionnent dans les bandes 6 et 4 GHz.

En 1977, une quarantaine de stations terriennes de différents types, installées dans 19 pays, utilisent ou ont utilisé le système SYMPHONIE de façon permanente ou temporaire.

Les principales missions confiées à ce système sont:

- des essais techniques et scientifiques concernant des transmissions téléphoniques (analogiques ou numériques) en AMRF et AMRT, des transmissions numériques de visiophonie et de télévision, des interconnexions entre calculateurs, et ce, au profit d'administrations de divers pays;
- des démonstrations de transmission TV de haute qualité (noir et blanc ou couleur);

– des transmissions à caractère culturel et humanitaire (TV éducative, UNESCO, ONU);
– des transmissions radioélectriques de téléphonie, de visiophonie et de télévision à caractère préopérationnel.

Les caractéristiques du satellite figurent au Tableau VII, celles des stations terriennes au Tableau VIII.

TABLEAU VII — *Données relatives aux satellites SY-1 et SY-2*

Masse en orbite (kg)	235
Dimensions (cm): diamètre	170
hauteur hors tout	200
Stabilisation	3 axes
Position orbitale: SY-1	49° E
SY-2	11,5° O
Précision de maintien en orbite (N-S/E-O)	< 0,25°
Nombre de répéteurs	4
Largeur de bande des répéteurs (MHz)	90
p.i.r.e. en limite de couverture (dBW)	29
G/T en limite de couverture (dB(K^{-1}))	−13
Antennes: une de réception	couverture globale
deux d'émission	couvertures régionales 14° × 9° à −4 dB
Polarisation	circulaire
Durée de vie prévue	5 ans

TABLEAU VIII — *Données relatives aux stations terriennes de SYMPHONIE*

G/T (dB(K^{-1}))	31,5 - 28 - 23 - 20
Diamètre (m)	14 à 16 - 8,8 - 4,5 - 3,3
Puissance d'émission (W)	de 100 à 3000

8. Satellite d'essai orbital (OTS) de l'Agence spatiale européenne

Le satellite OTS, dont la mise sur orbite a eu lieu en 1978, a pour mission:

– de démontrer les performances et la fiabilité en orbite de tout le matériel embarqué;
– d'exécuter des expériences sur la propagation des ondes radioélectriques dans l'atmosphère, la réutilisation des fréquences, etc.;
– de fournir une capacité de transmission de trafic préopérationnelle pour l'Europe.

Les six antennes à ondes centimétriques du satellite couvrent non seulement l'ensemble de l'Europe occidentale, mais encore le Moyen-Orient, l'Afrique du Nord, les Açores, les îles Canaries, Madère et l'Islande. Il a une capacité équivalente de 6000 circuits téléphoniques.

La charge utile se compose de deux modules distincts, le module A qui utilise une double polarisation rectiligne orthogonale, pour les stations terriennes de grande capacité, et le module B, qui utilise la polarisation circulaire, pour les petites stations terriennes.

Le programme de télécommunications expérimentales coordonnées d'OTS porte sur des expériences de deux genres: celles qui nécessitent des stations terriennes de grande capacité avec antennes d'un diamètre de 15 à 19 m, du type destiné au futur système opérationnel, et celles pour lesquelles on peut se contenter d'équipements terminaux bien plus simples et moins coûteux. Quatre stations terriennes européennes de grande capacité sont équipées d'antennes spéciales pour OTS: Fucino, près de Rome (qui appartient à l'organisme d'exploitation italien Telespazio); Bercenay-en-Othe, près de Troyes (construite par l'Administration française des P & T); Goonhilly Downs, dans le comté de Cornouailles; Usingen, près de Francfort-sur-le-Main (ces deux dernières appartenant respectivement au British Telecom. et à la Deutsche Bundespost). En outre, quelque 50 instituts, universités et organismes de télécommunications européennes participent aux expériences OTS, en mettant en œuvre plus de 30 petites stations terriennes, dont la plupart sont équipées d'antennes de 3 m de diamètre environ, le diamètre de certaines atteignant cependant 14 m.

Le satellite OTS, qui est à six faces, pèse 865 kg (y compris le moteur d'apogée) au décollage et 444 kg une fois mis en place sur l'orbite des satellites géostationnaires. L'engin spatial mesure 2,39 m de hauteur, 2,13 m de longueur et 9,26 m d'envergure transversale après déploiement de ses panneaux solaires.

Les étages de sortie du module A et du module B sont munis d'amplificateurs avec tube à ondes progressives de 20 watts. La durée d'utilisation du satellite est de 6 ans.

Les fréquences de fonctionnement sont indiquées dans le Tableau IX.

TABLEAU IX — *Fréquences de fonctionnement du satellite OTS*

Module A, liaisons montantes:	
récepteur TC	14 125 MHz
chaînes à 40 MHz	14 152,5 à 14 192,5 MHz
chaînes à 120 MHz	14 242,5 à 14 362,5 MHz
Module A, liaisons descendantes:	
chaînes à 40 MHz	11 490,0 à 11 530,0 MHz
émetteur TM	11 575,0 MHz
chaînes à 120 MHz	11 580,0 à 11 700,0 MHz
Module B, liaisons montantes:	
chaînes à 5 MHz	14 455,0 à 14 460,0 MHz
Module B, liaisons descendantes:	
émetteurs de radiobalise	11 786,0 MHz
chaînes à 5 MHz	11 792,5 à 11 797,5 MHz

9. Système du satellite SIRIO

SIRIO * est un satellite expérimental conçu, mis au point et construit entièrement en Italie, sous la responsabilité du Conseil national de la recherche (CNR). Il comporte un équipement pour expériences de propagation, en plus des équipements de télécommunications servant, par exemple, à la transmission et à la réception télévisuelles et téléphoniques dont la zone de service comprend l'Europe, la côte Est des Etats-Unis d'Amérique et le Canada. Le satellite SIRIO a été lancé le 25 août 1977 et a été placé sur l'orbite des satellites géostationnaires, à la longitude 15° W.

L'objectif principal du programme SIRIO est d'effectuer des expériences de propagation et de télécommunications dans la bande des ondes centimétriques (12 et 18 GHz) de façon à mesurer les affaiblissements et les distorsions des signaux dans différentes conditions météorologiques.

Il est prévu notamment de faire les expériences suivantes:

- mesure de l'affaiblissement absolu et relatif sur la liaison montante à 17 et à 17,8 GHz;
- mesure de l'affaiblissement absolu et relatif sur la liaison descendante à 11,3 et à 11,8 GHz;
- mesure de la distorsion de phase sur les liaisons montante et descendante;
- mesure des effets de la dépolarisation atmosphérique;
- transmissions télévisuelles analogiques et numériques à large bande;
- transmissions de téléphonie et de données à bande étroite.

SIRIO est un satellite géostationnaire de forme cylindrique à stabilité gyroscopique, dont le poids est de 398 kg au lancement et 210 kg en orbite. Ses caractéristiques figurent au Tableau X.

Deux stations terriennes, situées à Fucino et Lario, en Italie, assurent le support principal de la mission du satellite SIRIO.

Les caractéristiques principales figurent au Tableau XI.

La station terrienne de Fucino comprend également une station à ondes métriques et un centre d'exploitation pour la «gestion» de l'orbite et le traitement des données en provenance du satellite. L'expérience bénéficie également du concours de nombreuses organisations étrangères de la République fédérale d'Allemagne, des Pays-Bas, du Royaume-Uni, de France, de Finlande, des Etats-Unis d'Amérique et de l'Autriche, qui ont mis en place dans leurs pays respectifs des stations terriennes qui communiquent avec le satellite SIRIO.

* SIRIO est l'acronyme de Satellite Italiano di Ricerca Industriale Orientata (satellite italien pour la recherche dans le domaine industriel).

TABLEAU X — *Caractéristiques du satellite SIRIO*

Gamme de fréquences à la réception	17,0-17,8 GHz
Polarisation	circulaire, lévogyre
Température de bruit de la station spatiale de réception	3000 K
Largeur de bande pour l'expérience à large bande	35,0 MHz
Largeur de bande pour l'expérience à bande étroite	1,5 MHz
Largeur de bande pour l'expérience de propagation	800 MHz
Gain d'antenne	22 dB
Gamme de fréquences à l'émission	11,3-11,8 GHz
Polarisation	circulaire, dextrogyre
Puissance d'émission pour l'expérience à large bande	4,26 W max.
Puissance d'émission pour l'expérience à bande étroite	3 W max.
Puissance d'émission pour l'expérience de propagation	0,2 W max.
Durée d'utilisation	2-3 ans

TABLEAU XI — *Caractéristiques des stations terriennes*

Type d'antenne	réflecteur profilé
Diamètre	17,5 m
Type d'alimentation	Cassegrain
Température de bruit du système	250 K
Puissance d'émission: expérience à bande étroite	27 dBW
expérience à large bande	30 dBW
expérience de propagation	30 dBW

10. Satellites commerciaux nationaux des Etats-Unis d'Amérique

10.1 *Généralités*

Aux Etats-Unis d'Amérique, du fait de la demande en trafic de télécommunications commerciales, quatre systèmes commerciaux nationaux, ont été mis en service, dont trois fonctionnent sur 4 et 6 GHz avec quatre satellites en orbite pour chaque système, et un des systèmes fonctionnant sur 12 et 14 GHz avec deux satellites en orbite. Ces quatre systèmes sont connus sous les noms de WESTAR, SATCOM, COMSTAR et SBS.

10.2 *Les satellites*

Les quatorze satellites commerciaux nationaux des Etats-Unis d'Amérique en service en 1982 sont placés sur l'orbite des satellites géostationnaires. Les satellites du réseau WESTAR desservent à la fois la partie continentale des Etats-Unis d'Amérique, Hawaii et Porto Rico, avec 12 canaux de 36 MHz. Les satellites SATCOM et COMSTAR appliquent les techniques de réutilisation des fréquences avec polarisations croisées, dans les bandes de 4 et 6 GHz. Ainsi, chacun de ces satellites peut employer 24 canaux de 36 MHz chacun. SATCOM dessert la partie continentale des Etats-Unis d'Amérique, l'Alaska et Hawaii, et COMSTAR la partie continentale des Etats-Unis d'Amérique, Hawaii et Porto Rico. Le satellite SBS dessert la partie continentale des Etats-Unis avec huit canaux de 54 MHz chacun.

10.3 *Les stations terriennes*

Les quatre systèmes commerciaux nationaux à satellites relient entre elles plus de 5500 stations terminales terriennes aux Etats-Unis d'Amérique. WESTAR exploite des stations terminales avec antennes de 15, 10 et 4,5 m. Il offre des services de canaux loués à de nombreux systèmes de télévision par câbles ainsi que des services pour l'impression à distance des nouvelles. WESTAR dessert en outre de nombreuses stations terriennes équipées uniquement pour la réception et cinq stations terminales régionales d'émission du Service public de radiodiffusion. Le système SATCOM dessert des stations terriennes avec antennes de 13 et 10 m dans la partie continentale des

Etats-Unis d'Amérique et en Alaska, et des stations terminales avec antennes de 4,5 m en des endroits écartés de l'Alaska. COMSTAR dessert un réseau de stations terriennes avec antennes de 30 et 12 m situées dans la partie continentale des Etats-Unis d'Amérique et à Hawaii. Chaque station emploie la technique de la réutilisation de fréquence, grâce à la double polarisation. Ce réseau sert à décharger les liaisons de radiocommunications de Terre sur les trajets où le volume du trafic est considérable. Le système SBS dessert un réseau de stations terminales avec antennes de 7 et 5 m. Le mode de transmission principal est numérique avec des débits binaires allant de 43 Mbit/s à 225 Mbit/s.

11. Satellite expérimental de communication (capacité moyenne) (CS)

Au Japon, compte tenu de la demande nationale croissante de communications, y compris pour les services d'urgence, on a mis au point un satellite national expérimental de communication fonctionnant dans les bandes des 30 et des 20 GHz, le satellite expérimental de communication (capacité moyenne), et procédé à des expériences de différents types.

Ce satellite a été lancé en décembre 1977 et placé sur l'orbite des satellites géostationnaires. Il était doté de répéteurs fonctionnant dans les bandes des 30/20 GHz et 6/4 GHz et d'une antenne multibande à faisceau modelé. La zone desservie par l'antenne est limitée au territoire japonais. Les caractéristiques du satellite sont données dans le Tableau XII.

TABLEAU XII — *Caractéristiques du satellite expérimental de communication*

Masse en orbite	340 kg
Stabilisation	gyroscopique (90 tours/min)
Position sur l'orbite	135° E
Précision du maintien en position de la station (N-S/E-O)	$< \pm 0{,}1°$
Nombre de répéteurs	2 (6/4 GHz) 6 (30/20 GHz)
Largeur de bande des répéteurs	200 MHz par répéteur
p.i.r.e. par répéteur	29,8 dBW (4 GHz) 37,0 dBW (20 GHz)
Facteur de qualité *(G/T)* en limite de couverture	$-8{,}1$ dB(K^{-1}) (6 GHz) $-4{,}5$ dB(K^{-1}) (30 GHz)
Durée de vie prévue	3 ans

Les expériences portent sur la mesure des caractéristiques de l'équipement spécialisé embarqué, des caractéristiques de transmission des signaux et des caractéristiques de propagation, notamment dans les bandes des 30 et 20 GHz, ainsi que du fonctionnement du système de communication par satellite.

Les caractéristiques des stations terriennes de différents types qui participent à ces expériences sont résumés dans le Tableau XIII.

12. Systèmes à satellites utilisant la capacité du secteur spatial loué

Un grand nombre de pays exploitent actuellement ou prévoient d'exploiter leurs systèmes à satellites en utilisant le secteur spatial loué des satellites opérationnels. Normalement, ces systèmes doivent se plier à certaines contraintes en matière de protection contre les brouillages pour permettre une exploitation simultanée des réseaux utilisant le même satellite ou des satellites adjacents. Bien que ces contraintes puissent se traduire par certaines restrictions communes d'ordre technique, les différences climatiques ainsi que certaines spécifications précises, pour ne citer que ces facteurs, pourraient aboutir à l'existence d'une multitude de caractéristiques du secteur de Terre concernant les systèmes qui utilisent le secteur spatial loué.

Le Tableau XIV décrit en détail les caractéristiques d'un de ces systèmes, le système national à satellites du Brésil.

TABLEAU XIII — *Caractéristiques de stations terriennes*

	KASHIMA Station terrienne du service fixe		YOKOSUKA Station terrienne du service fixe		SENDAI Station terrienne du service fixe	Station terrienne pour îles éloignées	Petite station transportable (du type monté sur véhicule)		Petite station transportable (SCPC)
Fréquence (GHz)	30/20	6/4	30/20	6/4	30/20	6/4	30/20	6/4	30/20
Diamètre (m)	13,0	10,0	11,5	12,8	11,5(1)	11,5	2,7	3,0	2,0
p.i.r.e. (dBW)	94,1	74,2	92,7	91,0	92,5	81,0	75,0	66,0	56,3
Facteur de qualité (G/T) (dB(K^{-1}))	44,2	31,6	43,7	31,3	44,4	32,0	27,0	20,0	20,3

(1) Antenne Cassegrain à alimentation décalée (11,5 × 14,5 m)

TABLEAU XIV — *Caractéristiques du système brésilien de télécommunication par satellite (SBTS)*

Satellite		
Position	338,5° E	
Type	INTELSAT-IV-A, INTELSAT-V - 6/4 GHz (début 1983)	
Paramètres de la station terrienne		
Diamètre de l'antenne (m)	15 (Nombre: 1)	10 (Nombre: environ 20)
Monture	El-Az	El-Az
Gain de l'antenne (6 GHz) (dB)	57,4	53,4
Gain de l'antenne (4 GHz) (dB)	54,2	50,7
Ouverture à mi-puissance du faisceau (6 GHz)	0,25°	0,32°
Ouverture à mi-puissance du faisceau (4 GHz)	0,37°	0,48°
Température totale de bruit à la réception (K)	83	93
Facteur de qualité (G/T) (dB(K^{-1}))	35	31
Puissance d'émission (W)	3000	100-400-3000
Paramètres de transmission		
SCPC-MF: Ecartement des porteuses (kHz)	30	
Largeur de bande de bruit (kHz)	25	
Valeur efficace de l'excursion du signal d'essai (kHz)	5,2	
C/N_0 (dBHz)	56	
TV-MF: Largeur de bande (MHz)	20	
Norme vidéo	PAL-M	
Son	Sous-porteuse MF à 5,8 MHz	
MRF-MF: Porteuses comprenant de 60 à 972 voies		

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAMSON, B. N. et BRADY, M. A. [novembre 1962] The RELAY communications satellite system. Programme and conference digest of the International Conference on Satellite Communications of the IEE, 22-28.

BROWN, S. P. et SENN, G. F. [avril 1960] Project SCORE. *Proc. IRE*, Vol. 48, **4**, 624-630.

DICKIESON, A. C. [juillet 1963] The TELSTAR experiment. *BSTJ*, Vol. XLII, **4**, Part 1, 739-746.

GATLAND, K. W. [1964] *Telecommunication Satellites*, 130-155, Iliffe Books Ltd., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, Etats-Unis d'Amérique.

RATCLIFFE, J. A. [décembre 1961] The experimental investigation of space. *J. IEE*, Vol. 7, **84**, 738-739.

SCHREINER, W. A. [25 septembre-1er octobre 1963] The communications satellite RELAY. 14e Congrès international d'aéronautique, Paris. Doc. IAC N° 81.

Documents du CCIR

[1974-78]: 4/303 (U.R.S.S.).

BIBLIOGRAPHIE

BORODITCH, S. V., BIKOV, V. L., KANTOR, L. I., KYRILOV, C. P., PAIANSKY, Y. M., TSIRLIN, V. M. et SHIFFRINA, V. M. [novembre 1977] INTERSPUTNIK: ego nastoyachtchee i buduchchee (INTERSPOUTNIK: son présent et son avenir). *Elecktrosviaz*, **11**, 49-57.

CARASSA, F., DRUFUCA, G. et PARABONI, A. [1970] The italian satellite SIRIO SHF propagation and communication experiments: scientific objective and organization of the experiments. AIAA 3rd Communications Satellite System Conference, Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

FANTI, P. et TIRRO, S. The italian SIRIO Experiment: Satellite and Ground Equipment. AIAA 3rd communications Satellite System Conference, Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

FORTUCHENKO, A. D. [octobre 1965] Le satellite de télécommunication soviétique Molniya-I. *J. des Télécomm.*, Vol. 32, **10**, 442-424.

KURAKOV, P. S. et PETROV, I. J. [mai 1972] Some questions of communication satellites. *Radiotekhnika*, Vol. 27, **5**, 3-8.

SVIAZIZDAT [1965] *70 ans de radio* (en russe). Ed. Sviazizdat, Moscou, U.R.S.S.

TALIZIN, N. V., KANTOR, L. I. et TSEITLIN, M. Z. [1967] Vers la mise en service d'un système international opérationnel. *J. des Télécomm.* Vol. 34, **8**, 296-299.

UIT [1973] Le premier satellite canadien destiné aux télécommunications nationales. *J. des Télécomm.*, 40, **1**, 12-14.

RAPPORT 214-3 *

INFLUENCE DE L'EFFET DOPPLER ET DES DISCONTINUITÉS DUES A LA COMMUTATION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 7/4)

(1963-1966-1974-1978)

1. Introduction

Dans un système du service fixe par satellite, le signal reçu est soumis aux effets suivants:

- les écarts de fréquences dus à l'effet Doppler, qui dépendent de la vitesse relative du satellite par rapport aux stations terriennes,
- les discontinuités du temps de propagation et de l'effet Doppler dues aux différences de longueur des trajets radioélectriques et des vitesses relatives, lorsqu'on commute d'un satellite sur un autre satellite.

On étudie ici la valeur probable de ces effets ainsi que leur influence sur les différents types de signaux de télécommunication.

2. L'effet Doppler (pour les satellites non géostationnaires)

La valeur de l'écart de fréquence total dû à l'effet Doppler entre les stations extrêmes d'un système de service fixe par satellite dépend des longueurs d'onde utilisées et de la vitesse relative du satellite par rapport aux stations terriennes. La composante principale de la dérive due à l'effet Doppler, c'est-à-dire la dérive de la porteuse ou d'une fréquence de référence de la transmission, peut être supprimée dans le récepteur; cependant, il peut être également nécessaire de compenser la composante différentielle située dans la largeur de bande radioélectrique occupée par le signal, qui provoque un «étalement» ou un «rétrécissement» du signal dans la bande de base. Suivant la situation des stations terriennes et les caractéristiques de l'orbite, il peut y avoir soit addition soit soustraction des écarts de fréquence par effet Doppler qui se produisent, d'une part entre la station d'émission terrienne et le satellite, d'autre part entre le satellite et la station de réception terrienne. Si l'on prend 5000 km comme valeur probable de la hauteur minimale de l'orbite pour un satellite de télécommunication, l'«étalement» ou le «rétrécissement» du spectre du signal dans la bande de base ne dépasse pas 2×10^{-5}. Dans la plupart des cas pratiques l'altitude orbitale est plus grande et l'effet Doppler beaucoup plus faible, et même pratiquement nul dans le cas particulier du satellite géostationnaire.

La valeur maximale de l'effet Doppler résultant de transmissions à destination ou en provenance d'une station spatiale à bord d'un satellite placé sur une orbite circulaire peut être évaluée à partir de la relation:

$$\Delta F \approx \pm 3{,}0 \times 10^{-6} \times F \times s \qquad (1)$$

* Devrait être lu conjointement avec le Rapport 383.

dans laquelle

ΔF: écart de fréquence dû à l'effet Doppler,

F: fréquence de travail,

s: nombre de révolutions par jour (24 heures) du satellite par rapport à un point fixe de la surface terrestre.

Cette relation peut également être utilisée pour calculer l'écart maximal différentiel de fréquence dû à l'effet Doppler sur une bande de fréquences. Le Tableau I, destiné à faciliter les calculs, indique un certain nombre de valeurs de s pour diverses valeurs de l'altitude d'orbites circulaires équatoriales.

TABLEAU I

Nombre de révolutions par jour par rapport à la Terre, s	Altitude des orbites circulaires équatoriales (km)	Période (h)
0	35 600	24
1	20 240	12
2	13 940	8
3	10 390	6
4	8 080	4,8
5	6 420	4
6	5 170	3,4
7	4 190	3

Dans un système à répartition en fréquence pour l'accès multiple, chaque station participante utilise une portion de la bande de fréquences du répondeur du satellite. Comme les émissions provenant des différentes stations sont indépendantes dans le temps, un éventuel décalage de temps n'exerce aucun effet défavorable. En revanche, il se produira un effet Doppler, variable avec le temps, dans les émissions provenant de chaque station.

En ce qui concerne les satellites utilisés pour retransmettre simultanément des signaux en provenance de plusieurs stations terriennes, il peut être nécessaire de prendre spécialement en considération l'effet Doppler.

Le Tableau II montre les valeurs maximales des déplacements de fréquence par effet Doppler au satellite, sur 6 GHz. Ces valeurs correspondent à des orbites équatoriales, dans l'hypothèse où le satellite se déplace dans le même sens que la rotation de la Terre.

Pour éviter un brouillage par effet Doppler entre les canaux radioélectriques adjacents, on peut utiliser des bandes de garde. Suivant l'emplacement des stations, le signal émis par une station pourrait avoir sa porteuse déplacée vers les fréquences supérieures, tandis que celui émis par une station sur un canal adjacent aurait sa porteuse déplacée vers les fréquences inférieures. Une autre solution consiste à corriger les écarts de fréquence par des techniques appropriées.

Par exemple, en supposant une bande de garde d'une largeur égale au déplacement maximal par effet Doppler indiqué au Tableau II pour un système à dix canaux, la largeur totale des bandes de garde serait égale à 18 fois les valeurs indiquées (toujours sur 6 GHz).

TABLEAU II — *Déplacement de fréquence maximal par effet Doppler*

Période (h)	6	8	12	24
Altitude approximative (km)	11 000	14 000	20 000	36 000
Angle de site minimal de l'antenne: 5° Déplacement de fréquence maximal par effet Doppler sur 6 GHz (kHz)	55,4	37,2	18,5	0,24 (1)

(1) Cette valeur tient compte de différentes perturbations possibles de l'orbite de 24 heures, en supposant qu'il soit possible de maintenir le satellite dans une sphère de 60 km de rayon à partir de la position stationnaire vraie, auquel cas la vitesse maximale du satellite qui se dirige vers une station terrienne ou s'en écarte ne dépassera pas 5,8 m/s.

Dans un système d'accès multiple à répartition dans le temps (AMRT), toutes les stations terriennes émettent sur la même fréquence porteuse nominale. Il en résulte que cette porteuse ne doit être émise que pendant la durée de l'intervalle de récurrence qui est attribuée à la station. Pendant cette émission, la porteuse devrait probablement être modulée par déplacement de phase ou de fréquence. A cause de l'effet Doppler, les émissions arriveront au satellite et seront retransmises sur des fréquences qui varieront autour de la fréquence porteuse nominale. Pour tenir compte de ces décalages, les récepteurs des stations terriennes doivent pouvoir se régler sur les brusques changements de fréquence de la porteuse. Cela peut obliger à accroître le temps de garde entre les salves de signaux et à laisser, à l'intérieur d'une salve, davantage de temps pour le rétablissement de la porteuse et pour la synchronisation de la salve dans le cas de satellites non géostationnaires [Gabbard, 1968].

2.1 *Téléphonie*

Lorsque l'on utilise la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence, il est nécessaire de limiter la largeur de bande ou la vitesse angulaire apparente des satellites, rapportée au centre de la Terre, pour éviter toute valeur inadmissible de l'écart de fréquence différentiel dû à l'effet Doppler (à moins que l'on n'applique des corrections permettant de compenser cet effet).

D'après l'Avis G.225 du CCITT, la différence entre une fréquence vocale appliquée à une extrémité d'un circuit téléphonique et la fréquence reçue à l'autre extrémité ne doit pas dépasser 2 Hz. La question de l'erreur dans la fréquence restituée est toujours à l'étude par la Commission d'études XV du CCITT.

On notera qu'une erreur de 2 Hz n'est pas dépassée dans une liaison par un seul satellite si le produit de la bande de base (MHz) par le nombre de révolutions par jour, par rapport à la Terre, s, ne dépasse pas 0,666; cependant, il est probable que les équipements de multiplexage introduiront une erreur additionnelle.

Pour de telles vitesses angulaires, l'effet Doppler provoque également un décalage des fréquences pilotes. Ces écarts de fréquence peuvent être corrigés par l'une des méthodes suivantes:

- un dispositif à temps de propagation variable;
- les porteuses utilisées dans l'appareillage à multiplexage par une répartition en fréquence pourraient être réglées automatiquement pour compenser l'effet Doppler et réduire ainsi dans l'ensemble les erreurs de fréquence à des valeurs suffisamment faibles pour être admissibles.

La première de ces méthodes offre l'avantage que les erreurs dues au mouvement du satellite pourraient être supprimées efficacement de la même manière qu'elles ont été introduites (c'est-à-dire par les variations du temps de propagation durant les passages). Cette méthode éliminerait donc également tous les effets des écarts de fréquence sur les signaux de la bande de base, et des arrangements convenables permettraient d'éviter les discontinuités dues à la commutation lorsqu'on passe d'un satellite au satellite suivant sur l'orbite. Les variations du temps de propagation pourraient être réglées soit en se fondant sur les prévisions relatives à l'orbite soit sur un dispositif d'asservissement utilisant un signal pilote émis par la station terrienne à destination du satellite et renvoyé à cette même station terrienne (méthode de la boucle). La méthode de la boucle présente les avantages suivants:

- on est certain que le satellite ne reçoit que les fréquences correctes; cet avantage peut présenter une importance particulière pour certains systèmes, par exemple ceux qui utilisent des voies ou des groupes de voies très rapprochés avec modulation à bande latérale unique dans le sens Terre-satellite;
- l'étalement du signal, par suite de l'effet Doppler, pourrait, par exemple, être évité dans une certaine mesure en divisant la largeur de bande de réception en fractions convenablement séparées, et en prévoyant des compensations indépendantes pour les groupes de circuits en provenance de chacune des autres stations terriennes.

On pourrait employer une variante selon laquelle la compensation des variations du temps de propagation ne serait appliquée qu'à l'extrémité de réception et serait commandée par des signaux pilotes provenant des stations éloignées. Il faudrait en ce dernier cas adapter l'appareillage de multiplexage par répartition en fréquence de chacune des stations terriennes afin de tenir compte de l'«étalement» ou du «rétrécissement» de la bande de base résultant de l'effet Doppler. Les administrations sont priées de communiquer au CCITT leurs recommandations ou leurs conclusions au sujet de cette adaptation, y compris les méthodes de commande de l'appareillage de multiplexage par répartition en fréquence de la station terrienne, fondées soit sur le principe de la boucle, exposé plus haut au sujet de la première méthode, soit sur le principe d'une commande spéciale pour chaque relation desservie.

La correction de l'effet Doppler peut être nécessaire dans des systèmes du service fixe par satellite utilisant la modulation d'amplitude à bande latérale unique.

2.2 *Télégraphie et transmission de données*

Si des voies téléphoniques satisfont aux conditions de l'Avis G.225 du CCITT, cela signifie que, pour les voies télégraphiques et les voies de transmission de données que l'on peut réaliser sur elles, l'effet Doppler peut être négligé ou a été compensé de façon adéquate (voir le § 2.1).

2.3 *Phototélégraphie*

Si des voies de phototélégraphie sont réalisées sur des voies téléphoniques qui satisfont aux conditions de l'Avis G.225 du CCITT, on peut négliger l'effet Doppler en considérant qu'il a été compensé de façon adéquate.

2.4 *Transmission de données à large bande*

Il convient de noter que la correction de l'effet Doppler devrait être prévue pour les voies de phototélégraphie ou de transmission de données déduites des précédentes et exigeant de plus grandes largeurs de bande qu'une voie téléphonique unique (par exemple, des largeurs de bande de groupe primaire ou secondaire).

2.5 *Télévision*

La variation de la fréquence de trame due à l'effet Doppler est minime et il est vraisemblable que, du point de vue des perturbations apportées au fonctionnement des récepteurs domestiques de télévision monochrome, le facteur limitatif sera la précision de la fréquence de trame réalisable à l'émission des programmes et non l'effet Doppler.

Il se peut qu'il y ait finalement intérêt à corriger l'effet Doppler sur les signaux de télévision en couleur, mais les premières expériences faites avec les satellites ont montré que les récepteurs normaux pour la couleur fonctionneront dans de bonnes conditions, et en particulier ceux possédant des oscillateurs de sous-porteuses commandés par quartz, pour des ordres de grandeur du déplacement Doppler probable tels que ceux qu'on peut attendre dans un système pratique de service fixe par satellite.

3. Discontinuité due à la commutation (pour les satellites non synchrones)

Deux ou plusieurs stations terriennes ne peuvent utiliser des satellites, qui apparaissent et disparaissent, que lorsqu'il y a visibilité commune de ces stations par les satellites. Ces stations doivent alors commuter ou «passer» sur un autre satellite à visibilité commune pour maintenir la communication. Pour certaines orbites, ou lorsque les stations terriennes sont trop distantes les unes des autres, il peut se produire une interruption relativement longue quand la visibilité commune du premier satellite est perdue et avant qu'un autre satellite ait été acquis. On peut éviter de telles interruptions en utilisant des satellites contrôlés, équidistants et en nombre suffisant, sur des orbites ayant des projections récurrentes sur la Terre [Dalgleish et Jefferis, 1965]. Des systèmes de satellites ayant de telles orbites sont souvent appelés systèmes à satellites en phase. Le système de satellites en phase sur orbite équatoriale circulaire est le plus simple et le plus connu de ces systèmes.

Même si de tels systèmes peuvent éviter les interruptions lors de la commutation entre satellites, il y aura généralement de légères discontinuités dans les chevauchements des communications entre deux stations au moment de cette commutation, suivant que le trajet de propagation par le nouveau satellite est plus court ou plus long que celui passant par le satellite précédent. Le calcul de la longueur des trajets de propagation ou des temps de propagation, et leurs différences, est fondé sur des relations géométriques simples qui sont expliquées dans le Rapport 383 traitant de l'influence du temps de propagation.

Dans le cas d'une liaison à plusieurs bonds, il n'arrivera pas souvent que les discontinuités dues à la commutation sur les divers tronçons coïncident, si bien que leur nombre journalier sera égal à $n \times m$, n étant le nombre de bonds et m le nombre moyen journalier de discontinuités par tronçon à un bond. Pour les systèmes utilisant des satellites en phase, les différences de temps ne dépasseront pas 10 ms pour certaines paires de stations terriennes, tandis que, pour d'autres paires de stations, elles atteindront ou dépasseront 20 ms. Dans les systèmes de satellites non en phase, ces différences de temps seront comprises entre 0 et 30 ms ou plus. Il convient de noter que ces discontinuités peuvent être prévues et qu'il est possible de prendre des mesures pour y remédier. L'emploi du dispositif à temps de propagation variable permet de réduire cette discontinuité à des proportions négligeables.

Note. – Une station terrienne utilisant un satellite, géostationnaire ou non, peut voir ses circuits interrompus pendant des périodes de durée prévisible, lorsque le satellite utilisé se présente, pour la station terrienne, sous un angle voisin de celui du Soleil ou d'un autre satellite travaillant sur la même fréquence, ou encore lorsqu'un satellite alimenté par cellules solaires et ne disposant pas d'accumulateurs est éclipsé par la Terre. Si l'on veut éviter ces interruptions, il faut prévoir un acheminement détourné par des circuits de Terre ou par un autre satellite pendant ces périodes d'«absence de satellite».

3.1 *Téléphonie*

Des différences de temps de propagation dues à la commutation d'un satellite à un autre, pouvant atteindre par exemple 20 ms, ne devraient pas affecter gravement les conversations téléphoniques. Cependant, une discontinuité de cette importance dans la transmission peut causer des erreurs dans les systèmes de signalisation multifréquence existants tels que le système de signalisation intercontinentale N° 5 du CCITT et celui utilisé avec le système TASI. Les systèmes de signalisation tels que le système N° 6 du CCITT qui utilise des impulsions à grande vitesse risquent d'être beaucoup plus affectés par des erreurs dues à ce type de cause.

3.2 *Télégraphie et transmission de données*

Les effets qui nous intéressent sont ceux exclusivement dus à des différences de temps de propagation entre un trajet par satellite et un autre. Ces effets sont de deux types différents:

- l'allongement ou le raccourcissement d'éléments télégraphiques, lorsque la différence de temps de propagation est relativement grande, c'est-à-dire lorsqu'elle dépasse une fraction importante d'un élément,
- les discontinuités de phase d'une fréquence acoustique, qui donnent lieu à une distorsion télégraphique, chaque fois que la différence de temps de propagation dépasse une fraction de la période de la fréquence la plus élevée de la bande de base utilisée par une voie téléphonique d'un système à large bande servant pour la télégraphie harmonique [Zuhrt, Reger et Vollmeyer, 1959].

Selon certains renseignements préliminaires (voir l'Annexe I) il apparaît que, dans une voie télégraphique arythmique non protégée fonctionnant à 50 bauds, le nombre moyen des erreurs sur les caractères causées par des discontinuités d'une durée au plus égale à 7,5 ms peut ne pas dépasser environ 0,25 par discontinuité. Ce nombre moyen d'erreurs augmente probablement jusqu'à 1 pour les discontinuités d'une durée de l'ordre de 10 à 12 ms, tandis qu'il peut atteindre ou dépasser 2 pour les discontinuités de 20 à 30 ms.

La durée des discontinuités que l'on rencontrera vraisemblablement dans les systèmes à satellite non géostationnaire donnera lieu à des erreurs sur les caractères dans les systèmes de télégraphie synchrone et à multiplexage par répartition dans le temps. Ces discontinuités peuvent dénaturer les signaux de sélection comme ceux que l'on emploie dans le télex, causer des erreurs d'acheminement et, notamment sur les systèmes automatiques, être à l'origine d'erreurs possibles de taxation.

Sur certains circuits télégraphiques, notamment sur ceux qui comportent un prolongement par liaison à ondes décamétriques, on emploie des dispositifs de correction automatique des erreurs (ARQ). De tels dispositifs procurent, d'ailleurs, une protection contre les erreurs dues à d'autres causes encore que les discontinuités de commutation. Pour justifier que l'on accorde un traitement particulier aux circuits qui empruntent un système du service fixe par satellite, on doit tenir compte de la fréquence relative des perturbations donnant lieu à des erreurs selon qu'elles affectent la liaison spatiale et ses prolongements «de Terre» ou les circuits internationaux établis d'une autre manière. Si, après examen de toutes les causes d'erreur dans les voies télégraphiques, il apparaît nécessaire de prendre des mesures spéciales pour les erreurs dues aux discontinuités, on pourra sans doute envisager la possibilité de recourir à quelque dispositif particulier comme une mémoire tampon, laquelle, à la réception d'un signal de «changement de satellite», commence à emmagasiner les signaux télégraphiques, quitte à les retransmettre un peu plus rapidement après l'opération de commutation.

Une autre méthode, permettant de réduire le nombre des erreurs dues aux discontinuités de commutation, consisterait à utiliser un dispositif à temps de propagation variable.

Les discontinuités de l'ordre de 20 ms auraient deux effets dans la transmission des données:

- production d'erreurs dans un ou plusieurs blocs;
- décalage de phase dans un bloc.

Les erreurs du premier type ne seraient pas graves si le passage d'un satellite à un autre ne devait pas être trop fréquent; elles seraient, en fait, analogues aux effets des perturbations occasionnelles que la commutation ou le bruit produisent sur les circuits normaux sur lignes. Le décalage de phase dans un bloc est une conséquence directe de la discontinuité et n'a aucun équivalent dans les transmissions sur les systèmes sur ligne.

Il faudrait donc, dans les systèmes de transmission de données par satellite, rétablir la phase du bloc de signaux sur le circuit lors de chaque passage d'un satellite à un autre, à moins que l'on n'adopte, pour compenser la discontinuité dans le temps de propagation, des moyens spéciaux. Cependant, si les communications ne sont pas exagérément fréquentes et si l'on fait en sorte que la remise en phase du système de transmission de données soit une opération automatique, la perte de temps d'utilisation du circuit qui résulterait de cet effet ne constituerait pas un inconvénient bien sérieux.

3.3 *Phototélégraphie*

L'effet des discontinuités de commutation serait de produire un déplacement immédiat (en avant ou en arrière) de la partie de l'image reçue après la commutation par rapport à la partie reçue juste avant. Par exemple, avec un appareillage répondant aux normes du CCITT et dans le cas d'un cylindre tournant à 60 tours par minute, une discontinuité de 20 ms produirait un déplacement de l'ordre de 2% de la largeur de l'image, soit 0,5 cm pour une image de 25 cm de largeur. L'effet nuisible serait sérieux avec la plupart des images, écrits, cartes météorologiques, etc. Et ce déplacement serait encore plus important aux vitesses d'exploration plus élevées. La valeur tolérable du déplacement ainsi causé est une question dont il conviendrait évidemment de discuter avec le CCITT. Il apparaît, toutefois, qu'une discontinuité de l'ordre de 20 ms produirait une distorsion inacceptable dans la plupart des cas et qu'il faudrait chercher à l'éviter, soit en appliquant des méthodes de compensation appropriées, soit en faisant en sorte que la transmission de l'image n'ait lieu qu'en dehors des instants de commutation.

3.4 *Télévision*

La commutation due au passage d'un satellite non géostationnaire au suivant est très analogue à la commutation entre des sources de programmes «non synchrones» et elle peut produire des perturbations temporaires dans la base de temps des récepteurs. Dans la pratique, la durée effective d'une perturbation de cette espèce dépend de la relation de phase qui existe au moment de la commutation, mais cette durée est généralement comprise entre 0,5 et 2 secondes.

La variation du temps de propagation due à la commutation est susceptible d'introduire une petite discontinuité du signal son; cette discontinuité, quoique perceptible, ne devrait pas être gênante.

Etant donné que, dans un système à service fixe par satellite, les commutations seront vraisemblablement peu fréquentes, leurs effets sur les signaux vision et son ne devraient pas être très graves.

4. Résumé

L'importance de l'effet Doppler et des discontinuités dues à la commutation dans les systèmes de service fixe par satellite varie selon le type de service ou de signal transmis et selon les caractéristiques de l'orbite du satellite. D'une manière générale, on ne s'attend pas que l'effet Doppler et les discontinuités dues à la commutation soient appréciables dans les systèmes à satellite géostationnaire. Dans le cas des systèmes à satellite non géostationnaire, l'effet Doppler et les discontinuités dues à la commutation seront plus importants.

La composante principale de l'effet Doppler peut être supprimée dans le récepteur, mais il restera un «étalement» ou un «rétrécissement» de la bande de base, dû à l'effet différentiel. L'effet sera négligeable en télévision monochrome et sera probablement tolérable en télévision en couleur. En téléphonie, avec l'utilisation généralisée des techniques de multiplexage à large bande et à bande latérale unique, il faudra compenser les modifications de la bande de base (effet Doppler différentiel) par une égalisation des temps de propagation dans l'ensemble de la bande de base ou par la commande automatique des fréquences porteuses utilisées dans l'appareillage de multiplexage. Il semble que cette compensation soit réalisable. Il ne devrait pas y avoir lieu de tenir compte à nouveau de l'effet Doppler pour les voies de télégraphie, de transmission de données et de phototélégraphie réalisées sur des voies ayant déjà fait l'objet de correction pour la téléphonie.

Il apparaît que, faute de mesures spéciales, les discontinuités dues à la commutation entre satellites peuvent conduire, sur les voies télégraphiques, à des taux d'erreur qui, pour certaines situations d'une paire de stations terriennes par rapport à l'orbite, risquent de dépasser les limites souhaitables indiquées dans l'Avis R.54 du CCITT, à savoir 2 erreurs pour 100 000 caractères. On trouvera dans l'Annexe I une discussion de cette question avec l'exposé de certains moyens auxquels on peut recourir pour en atténuer les effets sur la transmission télégraphique.

On attire l'attention du CCITT et de la CMTT sur les problèmes que peuvent poser, dans les systèmes de service fixe par satellite, l'effet Doppler et les discontinuités dues à la commutation; dans le cas du CCITT, en ce qui concerne la téléphonie, la télégraphie, la phototélégraphie et la transmission de données et, dans le cas de la CMTT, en ce qui concerne la télévision, y compris la voie son associée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DALGLEISH, D. I. et JEFFERIS, A. K. [janvier 1965] Some orbits for communication satellite systems affording multiple access. *Proc. IEE*, Vol. 112, **1**, 21-30.

GABBARD, O. G. [août 1968] Design of a satellite time-division multiple-access burst synchroniser. *IEEE Trans. Com. Tech.*, Vol. COM-16, 589-596.

ZUHRT, H., REGER, W. et VOLLMEYER, W. [juin-juillet 1959] Distorsion télégraphique et taux d'erreur en télégraphie harmonique dus aux interruptions et aux écarts de phase (en allemand). *NTZ*, 12, **6** et **7**.

ANNEXE I

1. Avis du CCITT

Selon l'Avis R.57, le degré de distorsion isochrone sur une seule section ne doit pas dépasser 10%.

L'Avis R.54 suggère, dans ses considérants, qu'un taux d'erreur dû à la distorsion de 2 pour 100 000 signaux télégraphiques alphabétiques transmis constitue un objectif qu'il est souhaitable d'atteindre.

2. Taux d'erreur dans les systèmes de télégraphie arythmique à 50 bauds

Dans une série d'expériences préliminaires, on a étudié la relation entre la durée des discontinuités dues à la commutation et le taux d'erreur en télégraphie dans les systèmes arythmiques à 50 bauds. Ce taux dépend, dans une faible proportion, de la nature du texte transmis. Il apparaît qu'il ne peut pas varier beaucoup lorsque la durée de la discontinuité est comprise entre 0 et 7,5 ms environ; la valeur moyenne du nombre des erreurs est alors de l'ordre de 0,25 par opération de commutation. Quand la durée de commutation dépasse 7,5 ms, le taux d'erreur augmente. Cela peut s'expliquer par le fait évident que, dans ces conditions, l'allongement ou le

raccourcissement des éléments télégraphiques avoisine ou dépasse 50% de la durée de chacun d'eux. Les expériences préliminaires conduisent à penser que le nombre moyen d'erreurs sur les caractères peut être d'environ 1 par discontinuité pour les discontinuités de 10 à 12 ms et peut atteindre ou dépasser 2 pour les discontinuités de 20 ms et au-delà. Comme indiqué plus haut, ces résultats sont valables pour une rapidité de modulation de 50 bauds; la durée de chaque élément est alors de 20 ms et il n'est pas déraisonnable de conclure que, si la discontinuité atteint 30 ms, il peut ne pas y avoir plus de deux erreurs sur les caractères.

3. Compensation au moyen de dispositifs de correction à temps de propagation variable

3.1 *Compensation de précision moyenne*

On parviendrait à réduire considérablement les erreurs sur les paramètres dues aux discontinuités de commutation si des dispositifs de temps de propagation variable à commande appropriée pouvaient être connectés en cascade aux liaisons par satellite, afin que le temps de propagation global puisse rester constant. Une compensation dont la précision serait de l'ordre de 200 µs serait suffisante pour les erreurs sur les caractères dues à l'allongement ou au raccourcissement des éléments télégraphiques. La mise au point de dispositifs à large bande de ce genre présenterait, en outre, l'avantage d'éliminer, pour l'essentiel, les conséquences de l'effet Doppler dans la bande de base transmise, pour lesquelles il faudrait sans cela une commande spéciale des oscillateurs de transfert des groupes secondaires et primaires afin que les signaux de télégraphie harmonique restent bien centrés dans la bande passante des filtres correspondants.

Les effets exercés par les variations brusques de phase au moment de la commutation demeureraient cependant et, s'il est vrai que le taux d'erreur sur les caractères serait inférieur à celui auquel on peut s'attendre en l'absence de compensation, il n'en faudrait pas moins procéder expérimentalement à une évaluation sûre de sa valeur probable.

3.2 *Compensation de haute précision*

Pour éviter les erreurs sur les caractères dues aux variations brusques de phase au moment de la commutation, il apparaît nécessaire que la précision de la compensation corresponde à ± 15° à la fréquence la plus élevée de la bande de base. Dans le cas des circuits télégraphiques établis sur les voies téléphoniques les plus élevées d'un système à 1200 voies dont les fréquences de la bande de base peuvent aller jusqu'à 5 MHz, la précision devrait atteindre 0,01 µs. Or, la limite probable de la prévision de la distance d'un satellite correspond à un temps de propagation de l'ordre de 50 µs. En conséquence, il n'est pas possible d'assurer directement la compensation en une seule fois sur la base des prévisions avec une précision suffisante pour supprimer l'essentiel des erreurs télégraphiques. On pourrait, toutefois, envisager de prendre des mesures supplémentaires, par exemple d'installer un appareil à commande électronique qui introduirait un retard variable jusqu'au moment où les signaux aux fréquences de la bande de base reçus des deux satellites seraient en parfaite corrélation dans le temps, la commutation n'intervenant qu'alors.

Une autre solution, peut-être intéressante, consisterait à remplacer la commutation brutale par une sorte de fondu enchaîné relativement lent. On pourrait ainsi éviter les effets essentiels des variations brusques de phase et une faible proportion seulement des voies télégraphiques subirait des effets d'amplitude. Les signaux de télégraphie harmonique à modulation de fréquence pouvant tolérer une réduction de niveau d'au moins 15 dB, on pourrait atteindre un taux d'erreur de 1 caractère imprimé sur 80 000, mais ceci doit encore faire l'objet de vérifications théoriques et expérimentales. Il convient d'ailleurs de vérifier l'effet de ce fondu sur les circuits pour transmission de téléphonie, de données et de fac-similé.

4. Résumé des moyens de compensation

Lorsqu'on considère les divers moyens auxquels on peut recourir pour atténuer les effets des discontinuités dues à la commutation sur la qualité de la transmission télégraphique, on doit tenir compte de ce que, sur une voie télégraphique quelconque, il peut exister un certain nombre de causes d'erreurs.

On pourrait réduire le nombre des erreurs télégraphiques en faisant appel aux moyens suivants:

4.1 systèmes à mémoire tampon, qui commencent à enregistrer dès qu'ils reçoivent un signal de «changement de satellite» transmis sur le système et qui retransmettent à vitesse légèrement supérieure une fois que le changement de satellite a eu lieu;

4.2 correction de la discontinuité de précision moyenne, appliquée avec l'une ou l'autre des mesures suivantes:

4.2.1 affectation aux voies télégraphiques de la partie inférieure du spectre de la bande de base;

4.2.2 commande de la commutation des satellites au point où a lieu la manipulation télégraphique;

4.2.3 introduction d'un fondu enchaîné lent pour éviter les effets transitoires dus à une commutation brusque;

4.2.4 recodage de l'information télégraphique en codes spéciaux, tels que ceux mis au point par Hamming, qui donnent des facilités de correction sans obliger à une retransmission;

4.3 compensation précise des temps de propagation pour diminuer la discontinuité au moment de la commutation.

De plus, il devrait être possible d'utiliser un système ARQ ou équivalent. Ce procédé serait particulièrement utile dans le cas où la liaison par satellite est prolongée sur un circuit à ondes décamétriques ou sur tout autre type de circuit susceptible d'introduire un nombre relativement élevé d'erreurs télégraphiques.

RAPPORT 383-4 *

INFLUENCE DU TEMPS DE PROPAGATION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 7/4)

(1966-1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

Dans un système du service fixe par satellite, le signal est soumis à un temps de propagation très long dû au trajet radioélectrique. On étudie ici l'importance de cet effet pour différentes orbites et on montre quelles en seraient les influences sur les différents types de signaux de télécommunication.

2. Temps de propagation

Le temps de propagation total, dans un système du service fixe par satellite, dépend dans une large mesure de l'altitude des satellites et du nombre de sections (ou «bonds») Terre-satellite-Terre qui constituent la liaison.

Avec des satellites géostationnaires, le temps de propagation a une valeur pratiquement constante pour une liaison donnée; si les satellites ont un mouvement relatif par rapport à la Terre, la durée de propagation varie dans le temps; pour les satellites géostationnaires, cette variation est très faible par rapport au temps total sur le trajet de transmission.

Toutefois, dans certains cas, il se peut que même les très faibles variations du temps de propagation associées aux satellites quasi géostationnaires présentent une grande importance.

2.1 *Liaisons à un seul bond*

Pour une liaison à un seul bond, le temps de propagation minimal (t_{min}) correspond au cas où les deux stations sont très voisines l'une de l'autre et où le satellite se trouve exactement au zénith. Le temps de propagation maximal (t_{max}) correspond au cas où le satellite est vu à l'horizon par les deux stations terriennes. Si l'on désigne par h l'altitude du satellite, par r le rayon de la Terre et par c la vitesse de la lumière, si on pose $R = r + h$, et si on désigne par θ l'angle au centre de la Terre formé par les directions du satellite et de la station terrienne, le temps de propagation correspondant au trajet Terre-satellite est:

$$t = \frac{1}{c}\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta} \qquad (1)$$

On en déduit:

$$t_{min} = 2h/c \qquad (2)$$

$$t_{max} = (2h/c)\sqrt{1 + 2r/h} \qquad (3)$$

En pratique, le temps de propagation minimal est légèrement supérieur à t_{min} car les stations terriennes sont évidemment à une certaine distance l'une de l'autre. De même, le temps de propagation maximal est un peu plus petit que t_{max} car, dans la pratique, les stations terriennes travaillent avec des angles de site supérieurs à 3°, et peut-être souvent supérieurs à 5°. Quoi qu'il en soit, les formules ci-dessus permettent de calculer les valeurs minimale et maximale du temps de propagation dans une liaison à un seul bond (ainsi que la gamme de variations possible autour de la moyenne) pour diverses positions des stations terriennes; ces formules donnent des résultats suffisamment précis pour la présente étude.

---

* Devrait être lu conjointement avec le Rapport 214.

Pour tenir compte des temps de propagation sur les circuits de prolongement de Terre à partir des stations terriennes, il convient d'ajouter un temps de propagation supplémentaire calculé à partir de la formule indiquée dans l'Avis G.114 du CCITT:

12 + (0,004 × distance en kilomètres) ms,

ou

12 + (0,0064 × distance en miles) ms.

Dans cette formule, le terme constant de 12 ms tient compte des équipements terminaux et de la présence d'une certaine longueur de câble chargé, et les coefficients 0,004 (ou 0,0064) se fondent sur l'emploi de lignes à grande vitesse sur la plus grande partie des circuits de prolongement.

Pour les calculs estimatifs, comme il est improbable que l'on utilisera deux prolongements «de Terre» présentant des temps de propagation d'une valeur maximale dans une même communication, on estime raisonnable d'utiliser 30 ms comme valeur moyenne du temps de propagation pour l'ensemble des deux prolongements de Terre, la valeur minimale étant de l'ordre de 10 ms et la valeur maximale de l'ordre de 50 ms.

En ajoutant ces valeurs aux quantités t_{min} et t_{max} ci-dessus, on a calculé et consigné dans le Tableau I la gamme des valeurs du temps de propagation total (dans un seul sens) d'une liaison à un seul bond, pour des systèmes du service fixe par satellite. On notera que le tableau illustre le cas du temps de propagation minimal entre les stations terriennes augmenté du temps de propagation minimal dû aux circuits de prolongement de Terre, ainsi que le cas inverse du temps de propagation maximal entre les stations terriennes augmenté du temps de propagation maximal dû aux circuits de prolongement de Terre. En pratique, on peut très bien avoir un temps de propagation maximal entre stations terriennes avec un temps de propagation minimal dû aux circuits de prolongement de Terre, ou vice versa.

TABLEAU I

	Temps de propagation global (ms) (dans un seul sens)								
	Satellite non géostationnaire (altitude 11 000 km)			Satellite non géostationnaire (altitude 14 000 km)			Satellite géostationnaire (altitude 36 000 km)		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Entre les stations terriennes	74	109	92	92	128	110	240	280	260
Circuits de prolongement de Terre	10	50	30	10	50	30	10	50	30
Total	84	159	122	102	178	140	250	330	290

La Fig. 1 donne le temps de propagation maximal dans un seul sens sur le trajet radio et la longueur de l'arc de grand cercle de la partie de la Terre effectivement couverte par le satellite, en fonction de l'altitude du satellite, étant admis que, ni à l'émission ni à la réception, on ne travaille à des angles de site inférieurs à 5°. Cette longueur de l'arc de grand cercle ne détermine pas la distance de séparation maximale entre les stations terriennes, sauf pour un satellite géostationnaire. La nécessité d'avoir des communications continues avec des satellites non synchrones limite la distance entre les stations à une valeur comprise à l'intérieur de la zone de couverture commune des satellites successifs. Les limites concernant le fonctionnement ininterrompu avec des systèmes à un seul bond sont discutées dans le Rapport 206.

2.2 *Liaisons à plusieurs bonds*

Si l'on considère la géométrie d'un système de service fixe par satellite, on voit que le temps de propagation moyen des signaux radioélectriques augmente proportionnellement au nombre de bonds. Si l'on admet que le temps de propagation supplémentaire pour les circuits de prolongement de Terre (30 ms en moyenne) est le même dans tous les cas et que le temps de propagation correspondant à l'intercommunication entre bonds contigus est pratiquement nul, on obtient les valeurs figurant au Tableau II.

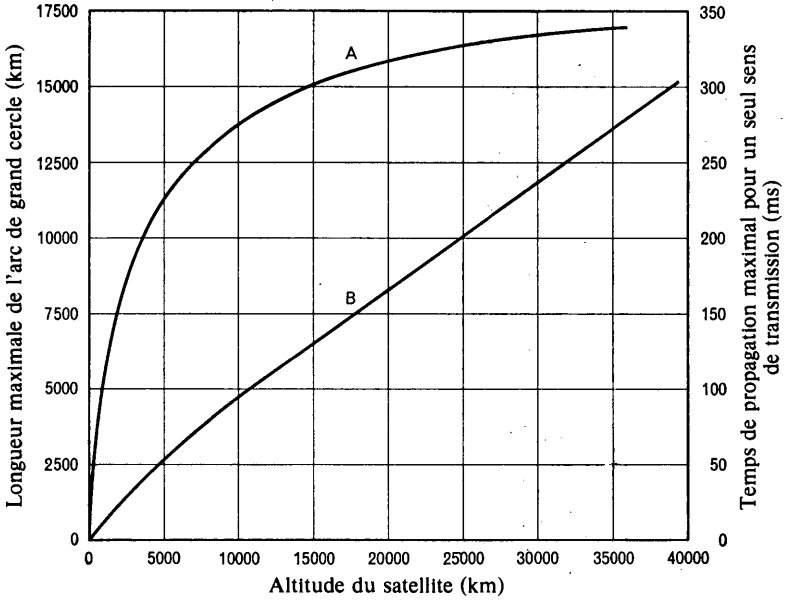


FIGURE 1 — *Système du service fixe par satellite à un seul bond (angle de site minimal: 5°)*

Courbes A : longueur maximale de l'arc de grand cercle (km)
B : temps de propagation maximal pour un seul sens de transmission (ms)

TABLEAU II

Nombre de bonds	Temps de propagation global (ms) (dans un seul sens)		
	Satellite non géostationnaire (altitude 11 000 km)	Satellite non géostationnaire (altitude 14 000 km)	Satellite géostationnaire (altitude 36 000 km)
1	122	140	290
2	214	250	550
3	306	360	

L'influence de ces temps de propagation sera examinée ci-après.

2.3 *Variation du temps de propagation en fonction du temps*

Dans un système mettant en œuvre des satellites animés d'un mouvement par rapport à la Terre, le temps de propagation dans une liaison quelconque est sujet à une variation progressive résultant de la variation de la distance entre le satellite et les stations terriennes. En pratique, dans un système du type mentionné ci-dessus, l'étendue de la gamme de variation ne dépasserait généralement pas 20 ms par bond.

Une des méthodes possibles pour supprimer, ou tout au moins réduire, cette variation au minimum consiste à insérer un dispositif à temps de propagation variable dans les circuits parcourus par les signaux dans une station terrienne. La valeur du temps de propagation inséré serait déterminée automatiquement par un système de régulation, de telle façon que les temps de propagation totaux aient toujours la même valeur constante, légèrement supérieure au temps de propagation maximal sur le trajet radioélectrique. L'utilisation d'une telle méthode pourrait également permettre de réduire l'influence des discontinuités dues à la commutation qui se produisent lors de chaque passage des circuits sur un autre satellite non géostationnaire. Ce point est examiné plus en détail dans le Rapport 214.

La variation du temps de propagation revêt une importance particulière pour les systèmes qui utilisent la division du temps pour l'accès multiple (système AMRT). Des variations, même relativement faibles, du temps de propagation (par exemple, inférieures à 1,0 ms pendant une période de 12 à 24 heures) peuvent présenter une grande importance dans certains cas, par exemple lorsque les circuits par satellite servent à la transmission de données entre des réseaux synchrones ainsi que dans les systèmes à accès multiple, tels que le système à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) et le système à accès multiple par différence de code (AMDC).

Dans les systèmes AMRT, l'émission de chaque station terrienne doit être insérée dans le train d'impulsions destiné au satellite au moment voulu pour chaque intervalle de récurrence. Or, par suite des variations du temps de propagation, on éprouve des difficultés à synchroniser les émissions des stations terriennes. En admettant même qu'on ait réalisé le synchronisme à un instant donné, il se produira des décalages dans le temps des positions relatives des émissions en provenance des différentes stations, à moins d'effectuer une régulation permettant de fixer les instants de début de ces émissions.

Pour faciliter l'expression de ces changements, le «temps de propagation différentiel» sera par définition la différence de temps séparant les instants d'arrivée, dans le satellite, des signaux émis simultanément par les stations *A* et *B*.

Autrement dit,

si τ_A est le temps de propagation de la station *A* au satellite à un moment quelconque,
si τ_B est le temps de propagation de la station *B* au satellite au même moment,

le temps de propagation différentiel, $\Delta\tau$, a pour expression

$$\Delta\tau = \tau_B - \tau_A \qquad (4)$$

D'ailleurs, intrinsèquement, cette grandeur n'est pas très importante. Une grandeur plus intéressante est la «variation du temps de propagation différentiel», $V\Delta\tau$, qui se produit dans un certain intervalle de temps. Le Tableau III donne les valeurs maximales de la «variation du temps de propagation différentiel», $V\Delta\tau$ max., qui peut se produire pour des satellites gravitant sur quatre orbites différentes.

TABLEAU III — *Variation maximale du temps de propagation différentiel*

Période orbitale (h)	6	8	12	24
Altitude approximative (km)	11 000	14 000	20 000	36 000
Angle de site minimal de l'antenne: 5°				
$V\Delta\tau$ max. (ms)	30,5	32,0	33,7	0,124 (2)
$V\Delta\tau$ max. (nombre d'intervalles de récurrence) (1)	244	256	269	1

(1) Dans ce cas, on suppose que chaque voie téléphonique est échantillonnée 8000 fois par seconde et que la durée d'un intervalle de récurrence est de l'ordre de 1/8000 de seconde, soit 125 µs.

(2) L'écart de temps indiqué tient compte des différentes perturbations dans l'orbite d'un satellite quasi géostationnaire, en supposant qu'il soit possible de maintenir le satellite dans une sphère de 60 km de rayon à partir de la position exacte, auquel cas la vitesse maximale du satellite vers ou à partir d'une station terrienne ne dépassera pas 5,8 m/s.

Il y a lieu de noter que ces variations se produisent lentement (par exemple, pour un satellite à l'altitude de 10 000 km, avec un angle de site minimal de 5° pour l'antenne, cette durée est d'environ 63 minutes). Il y aura néanmoins une certaine variation du temps de propagation pendant l'intervalle de temps nécessaire au signal pour effectuer le trajet aller et retour entre la station terrienne et le satellite. La valeur de cette variation pour différentes orbites est indiquée au Tableau IV; elle est exprimée en fraction de la durée d'un intervalle de récurrence (125 µs).

Les perturbations suivantes, pour autant qu'elles existent, entraînent des variations du temps de propagation sur une liaison par satellite quasi géostationnaire:

- l'excentricité de l'orbite entraîne des variations du temps de propagation présentant une période d'environ 24 heures. Par exemple, une variation de 60 km de l'altitude du satellite par rapport à sa projection sur la Terre se traduirait, en raison de l'excentricité de l'orbite, par une variation du temps de propagation aller et retour d'environ 0,4 ms en 24 heures, vue par une station terrienne;
- l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport au plan de l'équateur terrestre provoque des variations du temps de propagation présentant une période de 24 heures.

  Par exemple, une inclinaison de 0,5° de l'orbite peut entraîner des variations du temps de propagation aller et retour atteignant jusqu'à 0,74 ms en 24 heures vues par une station terrienne;
- la dérive d'est en ouest de la position longitudinale du satellite entraîne de lentes variations du temps de propagation.

Par exemple, une dérive de ± 0,5° de longitude de la position nominale du satellite peut entraîner des variations du temps de propagation aller et retour atteignant jusqu'à 0,74 ms, valeur type obtenue sur une période de plusieurs mois.

TABLEAU IV — *Variation maximale du temps de propagation aller et retour, vue par une station terrienne*

Période (h)	6	8	12	24
Altitude approximative (km)	11 000	14 000	20 000	36 000
Angle de site minimal de l'antenne: 5° Variation maximale du temps de propagation (nombre d'intervalles de récurrence)	0,004	0,003	0,002	0,00004 (1)

(1) L'écart de temps indiqué tient compte des différentes perturbations dans l'orbite d'un satellite quasi géostationnaire, en supposant qu'il soit possible de maintenir le satellite dans une sphère de 60 km de rayon à partir de la position exacte, auquel cas la vitesse maximale du satellite vers ou à partir d'une station terrienne ne dépassera pas 5,8 m/s.

Les perturbations citées plus haut ne sont généralement pas les principales causes de variation du temps de propagation. Il peut y avoir encore d'autres perturbations, mais qui sont accompagnées de variations plus faibles du temps de propagation.

2.4 *Variation du temps de propagation causée par le fonctionnement en diversité*

Les signaux provenant de deux stations fonctionnant en diversité auront des bases de temps différentes au point de commutation. Si ces deux stations peuvent être placées en azimut dans les limites de ± 30° par rapport au satellite, pour des angles de site du satellite inférieurs à 15°, cette différence de temps de propagation pourra être maintenue à 20 µs, ou moins, pour des espacements de 20 km. Le mouvement du satellite entraînera une variation de ± 0,5 µs de ce temps de propagation par rapport à sa valeur nominale. Avec d'autres emplacements, exigeant des espacements, des azimuts et des angles de site plus grands, les différences de temps de propagation seront plus importantes.

Les systèmes à modulation de fréquence ne pourront probablement tolérer ce temps de propagation, sans correction, que si l'on a affaire à des voies de 4 kHz ou à des transmissions radiophoniques. Si la transmission porte sur des données à moyenne ou grande vitesse dans la bande de base, il sera probablement nécessaire d'effectuer une correction du temps sur l'un des trajets afin de faire coïncider les bases de temps.

La transmission télévisuelle exige une synchronisation beaucoup plus précise. Il y a lieu d'étudier plus particulièrement ce problème.

3. Téléphonie

3.1 *Temps de transmission et écho*

Les membres du CCITT ont envoyé les résultats de nouvelles séries d'essais subjectifs qui manifestent une amélioration subjective de la qualité des circuits à temps de propagation élevé. Cette amélioration est attribuée à de nouvelles méthodes de protection contre l'écho (utilisation de compensateurs d'écho et de suppresseurs d'écho numériques). Les spécifications relatives à la qualité de transmission recommandée pour ces nouveaux appareils sont énoncées dans les Avis du CCITT G.165 pour les compensateurs d'écho et G.164 pour les suppresseurs d'écho numériques. Selon les résultats des essais subjectifs, les compensateurs d'écho donnent, sur les circuits à temps de propagation élevé, des résultats supérieurs à ceux des suppresseurs d'écho numériques, ces derniers étant eux-mêmes supérieurs aux suppresseurs d'écho classiques définis dans l'Avis G.161 du CCITT (Livre jaune).

Compte tenu de ces résultats, les Commissions d'études XII et XVI du CCITT ont, lors de la VII[e] Assemblée plénière du CCITT, Genève, 1980, adopté un texte révisé pour l'Avis G.114 relatif aux limites du temps de propagation moyen dans un seul sens.

La section pertinente du texte ainsi révisé de l'Avis G.114 est reproduite ci-dessous:

« Avis G.114

TEMPS DE PROPAGATION MOYEN DANS UN SENS

(Genève, 1964; modifié à Mar del Plata, 1968 et Genève, 1980)

Les temps dont il est question dans le présent Avis sont les moyennes des temps de propagation dans les deux sens de transmission d'une communication. Lorsque les deux sens de transmission sont établis sur deux supports différents (par exemple au moyen d'une voie par satellite pour un sens et d'un circuit terrestre pour l'autre), les deux valeurs de temps à partir desquelles est établie la moyenne peuvent différer de façon considérable.

1 **Limites pour une communication** (anciennement partie A)

Dans une communication téléphonique internationale, il est nécessaire de limiter le temps de propagation entre deux abonnés. A mesure que le temps de propagation augmente, les difficultés des abonnés augmentent et le taux d'accroissement de ces difficultés augmente également. Des renseignements pertinents, particulièrement en ce qui concerne l'alinéa b) ci-après, figurent dans les références de [1] à [10].

En conséquence, à titre d'objectif de fonctionnement du réseau, le CCITT *recommande* d'appliquer les limites suivantes pour le temps de propagation moyen dans un sens lorsqu'il existe des sources d'écho et que l'on utilise des dispositifs de protection contre les échos (suppresseurs ou compensateurs d'écho, par exemple):

a) 0 à 150 ms, acceptable.

Remarque – On peut employer les suppresseurs d'écho spécifiés dans l'Avis G.161 du Livre bleu [11] pour les temps de propagation ne dépassant pas 50 ms (voir le § 2.2 de l'Avis G.131);

b) 150 à 400 ms, acceptable, pourvu que l'on prenne de plus en plus de précautions sur les communications lorsque le temps de propagation moyen dans un sens dépasse environ 300 ms et pourvu que l'on emploie des dispositifs de protection contre les échos (suppresseurs et compensateurs d'écho, par exemple) conçus pour des circuits à long temps de propagation;

c) au-dessus de 400 ms, inacceptable. Des communications présentant de tels temps de propagation ne devraient être utilisées que dans des circonstances tout à fait exceptionnelles.

Jusqu'au jour où des renseignements additionnels significatifs leur permettront de mieux déterminer des limites acceptables pour le temps de propagation, les Administrations tiendront pleinement compte des données contenues dans les documents cités en référence pour choisir, parmi les différentes possibilités, les plans correspondant à des temps de propagation compris dans les limites indiquées au § b) ci-dessus.

Remarque 1 – Les valeurs ci-dessus concernent seulement le temps de propagation entre deux abonnés. Cependant, pour d'autres applications (par exemple, dans l'Avis G.131), le temps de propagation moyen dans un seul sens d'un trajet d'écho doit être estimé. Les valeurs indiquées au § 2 du présent Avis peuvent être utilisées dans leur évaluation.

Remarque 2 – Il est fort probable que la qualité de fonctionnement assurée par des compensateurs d'écho placés aux deux extrémités d'une communication à temps de propagation long sera supérieure à celle obtenue avec des types de suppresseurs d'écho courants.

Remarque 3 – Il convient de noter que, bien qu'un suppresseur d'écho et un compensateur d'écho soient compatibles sur la même communication (leur interfonctionnement est satisfaisant), on ne tire parti au maximum des avantages offerts par les compensateurs d'écho que s'ils sont placés à chacune des deux extrémités. En effet, une Administration qui remplace unilatéralement ses suppresseurs d'écho par des compensateurs d'écho apportera peu d'avantages à ses propres abonnés sur les communications internationales s'il y a un suppresseur d'écho à l'autre extrémité.

Références

[1] *Livre rouge* du CCITT, tome V *bis*, annexe E (Etats-Unis), UIT, Genève, 1965.

[2] *Ibid.*, annexe F (Royaume-Uni).

[3] *Ibid.*, annexe 4 à la Question 6/XII (Italie).

[4] *Livre blanc* du CCITT, tome V, suppléments n^{os} 1 à 6, UIT, Genève, 1969.

[5] BARSTOW, (J. M.): Results of user reaction tests on communication via Early Bird satellite, *Progress in Astronautic Aeronautics*, 19, 1966, Academic Press, New York et Londres.

[6] HELDER, (G. K.): Customer evaluation of telephone circuits with delay, *Bell System Technical Journal*, 45, septembre 1966, pp. 1157-1191.

[7] RICHARDS, (D. L.): Transmission performance of telephone connections having long propagation times, *Het PTT-Bedrijf*, XV, n° 1/2, mai 1967, pp. 12-24.

[8] KARLIN, (J. E.): Measuring the acceptability of long delay transmission circuits used during the *Early Bird* transatlantic tests in 1965, *Het PTT-Bedrijf*, mai 1967, pp. 25-31.

[9] DE JONG, (C.): Observations on telephone calls between the Netherlands and the USA, *Het PTT-Bedrijf*, mai 1967, pp. 32-26.

[10] HUTTER, (J.): Customer response to telephone circuits routed via a synchronous-orbit satellite, *POEEJ*, volume 60, octobre 1967, p. 181.

[11] Avis du CCITT *Caractéristiques d'un demi-suppresseur d'écho différentiel commandé à distance*, Livre bleu, tome III, Avis G.161, UIT, Genève, 1965.»

Dans les applications de liaison entre satellites, il est souhaitable que le temps de transmission du signal admissible dans une voie téléphonique du circuit inter-satellites ne dépasse pas environ 110 ms, conformément à l'Avis G.114 du CCITT. Dans ce cas, l'angle de séparation entre deux satellites géostationnaires ne devrait pas dépasser une valeur d'environ 50° (Rapport 451).

La contribution du CCITT COM XII-N° 165 (1977-1980) donnait des renseignements sur la qualité subjective des circuits à deux bonds par satellites géostationnaires. Selon les résultats obtenus, ces circuits, dotés de compensateurs d'écho, donnaient lieu à une évaluation subjective meilleure que celle relevée dans le cas de circuits à un seul bond par satellite géostationnaire munis de suppresseurs d'écho conformes aux dispositions de l'Avis G.161 du Livre jaune du CCITT. Cependant, ce résultat est considéré comme ayant un caractère préliminaire car il n'est mentionné que dans une seule contribution et parce que les données de base de cette expérience sont relativement limitées.

3.2 *Echo et suppresseurs d'écho*

On dispose aujourd'hui de nouveaux dispositifs de protection contre l'écho, compensateurs d'écho et suppresseurs d'écho numériques, conçus pour des circuits à temps de propagation longs ou courts. Dans la contribution COM XII-N° 165 (1977-1980) de la Commission d'études XII du CCITT, l'AT & T signale que, sur les circuits à temps de propagation élevé, le compensateur d'écho donne de meilleurs résultats que le suppresseur d'écho numérique, ces deux dispositifs donnant d'autre part des résultats supérieurs à ceux des suppresseurs d'écho décrits dans l'Avis G.161 du Livre jaune. Ces différences relatives augmentent à mesure que s'accroît le temps de propagation aller-retour entre un demi-bond (270 ms), un bond (540 ms) et deux bonds (1080 ms).

L'Avis G.164 du CCITT sur les suppresseurs d'écho numériques spécifie un temps de propagation aller-retour de 24 ms sur les circuits de prolongement. Dans le cas du compensateur d'écho, l'Avis G.165 du CCITT ne spécifie pas encore cette valeur. Des essais subjectifs ont été menés au cours desquels la plage de fonctionnement des compensateurs d'écho était de 16 ms et de 25,6 ms, ces valeurs étant liées à des considérations relatives au réseau.

Comme indiqué dans la contribution COM XII-N° 155 (1977-1980) de la Commission d'études XII du CCITT, des essais ont été menés par Bell Northern Research et l'Association canadienne des entreprises de télécommunications (ACET): dans ces essais, l'une des extrémités d'un circuit à un seul bond par satellite géostationnaire était munie d'un suppresseur d'écho simple, l'autre extrémité étant associée avec un compensateur d'écho. Il a été relevé que cette combinaison ne créait pas de problèmes d'incompatibilité importants. De plus, la qualité subjective des circuits à un seul bond par satellite géostationnaire dotés de compensateurs d'écho à chaque extrémité est nettement supérieure à celle que donne la combinaison suppresseur d'écho/compensateur d'écho.

3.3 *Contrastes dans le temps de propagation*

Les communications téléphoniques acheminées sur des circuits comportant une liaison par satellite étant forcément affectées d'un temps de propagation un peu plus long que les autres, les abonnés pourront constater des contrastes entre leurs diverses conversations internationales, dus aux divers circuits utilisés pour établir les communications.

D'après les résultats fournis au CCITT par le Royaume-Uni et l'AT & T Co. relatifs à l'utilisation de circuits d'un câble transatlantique et de circuits par satellite, aucun effet de cette sorte ne s'est montré statistiquement significatif, les abonnés ayant été soumis à divers temps de propagation pendant une période de quatre mois.

4. Télégraphie et transmission de données

Dans le cas des transmissions unilatérales, le temps de propagation n'a guère d'importance. Néanmoins, le temps de propagation en boucle est important lorsque l'on utilise la correction automatique d'erreur par demande de répétition. Bien que les circuits réalisés sur des systèmes du service fixe par satellite ne risquent pas d'introduire eux-mêmes des erreurs significatives dans la transmission des données et dans la transmission télégraphique, il se peut que les stations terriennes des systèmes à satellites soient reliées à des stations terminales plus éloignées par d'autres moyens de télécommunication utilisant par exemple les ondes décamétriques, lesquels peuvent, de leur côté, introduire des erreurs. En pareil cas, il peut être avantageux d'appliquer la correction automatique d'erreur au circuit complet, y compris la liaison par satellite. Le temps de propagation en boucle revêt alors de l'importance, puisqu'il influe sur l'efficacité de transfert et sur la capacité de mémoire requise.

On a indiqué, aux § 2.1 et 2.2, les temps de propagation que l'on peut rencontrer dans des circuits composites de ce genre. Les systèmes de correction automatique d'erreur (ARQ) les plus couramment utilisés devraient, avec un cycle de répétition de huit caractères, pouvoir fonctionner avec des temps de propagation en boucle de 850 ms. Dans le cas des liaisons utilisant deux satellites géostationnaires en chaîne, il faudra une capacité de mémoire plus grande; il pourrait en être de même pour des liaisons utilisant trois satellites non géostationnaires en chaîne.

Si l'on utilise des systèmes de correction automatique d'erreur par demande de répétition (ARQ) particulièrement sensibles aux longs temps de propagation sur les liaisons par satellite, cela risque de dégrader sérieusement l'efficacité de transfert. Il convient donc de choisir avec soin le système de correction d'erreur à employer pour la transmission de données par satellite.

Pour les systèmes de transmission de données avec répétition automatique de blocs de signaux incorrectement reçus, il faudrait que la capacité de mémoire de l'équipement terminal fût suffisante pour que l'on puisse s'accommoder de tous les temps de propagation, à savoir le temps de propagation radioélectrique et les délais de commutation.

Dans l'exploitation télégraphique avec commutation, certaines difficultés pourraient affecter la sélection automatique à grande distance. Il s'agit là d'un problème que le CCITT devrait étudier.

Il est peu probable que la variation lente qui résulte de celle de la longueur du trajet entre la station de satellite et les stations terriennes donne lieu à quelque difficulté pour la transmission de données ou de télégraphie.

5. Phototélégraphie

Le temps de propagation en lui-même n'a aucune importance, mais l'effet des variations lentes est de produire une déformation «en biais» de l'image reçue, déformation dont l'importance dépend de la quantité dont le temps de propagation varie pendant la durée nécessaire pour transmettre l'image tout entière; cette durée est de l'ordre de 15 minutes pour un équipement fonctionnant conformément aux Avis du CCITT, à 60 tours par minute. Dans un système opérationnel du service fixe par satellite, la variation pendant une durée de 15 min ne dépasserait probablement pas 10 ms, ce qui entraînerait, à la périphérie de l'image, un déplacement de la ligne d'exploration finale d'environ 1% de la largeur de l'image par rapport à la position qu'elle devrait théoriquement occuper. Cette déformation «en biais» serait acceptable dans la pratique. On notera, d'ailleurs, qu'une telle déformation peut également provenir d'une différence entre les vitesses de rotation des cylindres d'émission et de réception. Le CCITT recommande que l'on respecte à cet égard une tolérance de 10^{-5}, ce qui est précisément équivalent à une variation de 10 ms pour une durée de 15 min. Dans les cas les plus défavorables, où les deux variations ajouteraient leurs effets nuisibles, la déformation en biais pourrait atteindre environ 3% de la largeur de l'image; mais une addition aussi défavorable des erreurs aurait peu de chances de se produire fréquemment. Ce qui précède est vrai pour les équipements conformes aux Avis du CCITT, mais s'applique aussi bien à d'autres types d'équipements qui, malgré les différences dans la vitesse de transmission, obéissent à des normes de définition semblables.

Pour les images en couleur transmises par le procédé de séparation des couleurs, des variations du temps de propagation peuvent empêcher un enregistrement correct.

6. Télévision

Les temps de propagation indiqués au § 2 ne limiteront en rien la transmission de signaux de télévision, à condition que les temps de propagation pour les signaux sonores correspondants soient du même ordre de grandeur.

Pour que le défaut de synchronisme entre le son et l'image ne soit pas perceptible, on ne peut normalement tolérer qu'un écart total assez faible entre les signaux son et image. Il est donc souhaitable de prévoir, dans un système du service fixe par satellite, des moyens permettant d'assurer d'un bout à l'autre du système la transmission simultanée des signaux image et des signaux son correspondants.

7. Résumé

Le temps de propagation global n'a pas été pris en considération pour les services qui utilisent des transmissions unilatérales, par exemple en télévision ou en phototélégraphie monochrome ou pour les systèmes de télégraphie et de transmission de données ne nécessitant pas une correction d'erreur. Il peut y avoir lieu, en revanche, d'adapter les systèmes de télégraphie et de transmission de données munis de dispositifs de correction automatique des erreurs, afin de tenir compte de ce que le temps de transmission dans les communications par l'intermédiaire de satellites sera généralement plus long que par les autres procédés. Dans le cas de la télévision avec voie son associée, ce qui est normalement le cas, il faudra s'assurer que la différence entre les temps de propagation reste dans des limites acceptables. Il est souhaitable que le même système à satellites assure la transmission de l'image et du son.

Il a été démontré que le temps de propagation en téléphonie est moins important lorsque l'on assure une protection appropriée contre les échos. Les résultats d'essais effectués récemment ont montré une nette amélioration de la qualité subjective lors de l'utilisation des nouveaux compensateurs d'écho conformes aux dispositions de l'Avis G.165 du CCITT et de suppresseurs d'écho numériques conformes aux spécifications de l'Avis G.164 sur les communications internationales à temps de propagation élevé. Il convient d'observer que, à mesure que le temps de propagation moyen dans un seul sens augmente, la différence relative de qualité augmente elle aussi entre les compensateurs d'écho, les suppresseurs d'écho numériques et les suppresseurs d'écho conformes à l'Avis G.161 du CCITT (Livre jaune), la qualité la meilleure étant obtenue, quelles que soient les conditions de temps de propagation, avec les compensateurs d'écho.

BIBLIOGRAPHIE

CAMPANELLA, S. J., SUYDERHOUD, H. G. et ONUFRY, M. [octobre 1970] Subjective evaluation of predicted multiple-hop satellite communications for government and military users. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-18, **5**, 663-672.

DI BIASO, L. S. [27-29 novembre 1979] Satellite user reaction tests, a subjective evaluation of echo control methods. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington DC, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Vol. 3, IEEE Catalog N° 79CH1514-9, Session 48: Advances in echo control for telecommunications, 48.6.1-48.6.6.

HELDER, G. K. et LOPIPARO, P. C. [septembre 1977] Improving transmission on domestic satellite circuits. *BSTJ*, Vol. XLV, 7, 1157-1191.

POST, J. A. et SILVERTHORN, R. D. [27-29 novembre 1979] Results of a subjective comparison of echo control devices in terrestrial and satellite trunks. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington DC, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Vol. 3, IEEE Catalog No. 79CH1514-9, Session 48: Advances in echo control for telecommunications, 48.4.1-48.4.5.

SUYDERHOUD, H. G., CAMPANELLA, S. J. et ONUFRY, M. [automne 1975] Results and analysis of worldwide echo canceller field trial. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 5, **2**, 253-274.

RAPPORT 451-3

FACTEURS AFFECTANT LA CONCEPTION DES SYSTÈMES ET LE CHOIX DES FRÉQUENCES POUR LES LIAISONS INTER-SATELLITES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1970-1974-1978-1982)

1. Généralités

Les liaisons de radiocommunication entre stations spatiales du service fixe par satellite constituent un moyen d'interconnexion des réseaux à satellite. Elles offrent une solution de remplacement à l'utilisation de systèmes d'antennes multiples dans les stations terriennes ou de liaisons à plusieurs bonds. Plusieurs essais de mise en œuvre de cette technique ont donné des résultats satisfaisants.

Reconnaissant les possibilités des liaisons inter-satellites, la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales de 1971 (CAMTS) a adopté une définition du service inter-satellites. La CAMR-79 a attribué à ce service des fréquences supérieures à 22 GHz. Il peut également être avantageux d'exploiter les liaisons inter-satellites à des fréquences plus basses.

Le présent Rapport examine à grands traits certaines des notions impliquées par l'établissement de liaisons inter-satellites et les conditions techniques imposées à l'exploitation de ces liaisons.

Bien que l'emploi de faisceaux de laser pour les télécommunications entre engins spatiaux doive être possible, le fait qu'ils ont une ouverture extrêmement faible ainsi que d'autres limitations tendent jusqu'à présent à favoriser l'emploi des ondes millimétriques ou d'autres modes de radiocommunications, aussi ne considérera-t-on dans ce Rapport que le domaine de fréquences de 3 GHz à 300 GHz.

2. Avantages et inconvénients des liaisons inter-satellites

Les liaisons entre satellites procurent au moins quatre grands avantages:

- réduction du nombre des stations terriennes nécessaires et/ou des antennes correspondantes;
- meilleure répartition éventuelle de la capacité disponible sur les trajets Terre et espace;
- extension (globale) des possibilités d'interconnexion pour les stations terriennes ayant accès aux satellites au moyen de faisceaux très étroits;
- plus grande souplesse pour l'organisation des réseaux.

L'exemple suivant permettra de se représenter ces avantages. Considérons le cas limite hypothétique d'un système comprenant, pour chaque station terrienne, un satellite entièrement affecté au seul trafic avec une seule station terrienne (satellite «à l'attache»). Les communications entre les stations terriennes du système seraient établies par l'intermédiaire de liaisons inter-satellites sur l'arc d'orbite. Chaque satellite serait, en fait, une très longue extension de la station terrienne à laquelle il est lié.

Dans ce cas extrême de satellites «à l'attache», toutes les inefficacités d'utilisation de la capacité réelle en puissance et en largeur de bande, dues:

- au groupement des circuits,
- aux contraintes de connexion,
- à la commutation,
- au multiplexage, etc.,

sont transférées des liaisons Terre vers espace à l'arc d'orbite des satellites géostationnaires. Dans les limites de cet arc, et hors des liaisons avec la Terre, l'augmentation considérable du spectre disponible en longueurs d'ondes décimillimétriques ou optiques supporterait mieux les inefficacités dues aux contraintes des connexions de circuits dans le système.

De plus, comme une seule station terrienne serait en liaison avec chaque satellite, la zone de couverture requise pour l'antenne du satellite serait réduite au minimum. En théorie, on peut utiliser une antenne de satellite à faisceau très étroit dirigé vers la Terre, insensible aux brouillages qui pourraient être causés sur un trajet montant par les signaux en provenance d'autres stations terriennes et réduisant au minimum les brouillages qu'il pourrait causer à d'autres stations terriennes sur le trajet descendant. Grâce au faible niveau de puissance surfacique brouilleuse produite par les lobes latéraux de l'antenne, il serait possible de réduire l'espacement entre satellites. De plus, avec une seule connexion bidirectionnelle aboutissant à la station terrienne, la capacité serait encore augmentée bien au-delà des possibilités des antennes à faisceau très étroit, par l'emploi d'une seule onde porteuse par répéteur de satellite (c'est-à-dire intermodulation réduite et recul («back-off») de l'étage de puissance du répéteur faible ou nul).

Un système idéal de ce genre permettrait de porter au maximum d'efficacité l'utilisation du spectre radioélectrique sur le trajet espace vers Terre. Etant donné que la gamme supérieure du spectre des fréquences offre de plus grandes possibilités pour les liaisons inter-satellites, il est raisonnable de s'attendre que la capacité de l'orbite dépendrait encore principalement de la capacité des liaisons Terre vers espace, même dans leur configuration la plus avantageuse. Il semblerait donc que le modèle idéal qui vient d'être décrit représente le nec plus ultra de l'utilisation possible de l'orbite des satellites géostationnaires. Des systèmes moins perfectionnés utilisant des liaisons inter-satellites pour connecter les engins spatiaux, chacun desservant plusieurs stations terriennes, auraient les mêmes avantages, mais à un degré moindre.

Toutefois, l'Avis G.114 du CCITT spécifie une limite de 400 ms pour le temps de propagation admissible d'un signal dans une voie téléphonique. Le temps de propagation d'un signal sur une liaison établie au moyen d'un seul satellite géostationnaire, y compris le temps de propagation sur les connexions de Terre, est généralement de l'ordre de 290 ms. Le temps de propagation admissible d'un signal dans une voie téléphonique sur une liaison inter-satellites ne doit donc pas dépasser une durée de l'ordre de 110 ms. L'angle de séparation entre les deux satellites géostationnaires est défini par la formule:

$$\theta \leqslant 2 \text{ arc sin } \frac{t \cdot C}{2\,(R_E + H)}$$

où

t : temps de propagation admissible d'un signal dans une voie téléphonique sur une section satellite à satellite

C : vitesse de propagation des ondes radioélectriques

R_E : rayon de la Terre

H : hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre.

Conformément à l'Avis G.114 du CCITT, l'angle de séparation de deux satellites géostationnaires dans une liaison inter-satellites utilisant la téléphonie ne doit pas dépasser une valeur de l'ordre de 50°.

A court terme, en vue d'augmenter économiquement la capacité existante avec le minimum de répercussions sur les systèmes en service, il faudra envisager d'utiliser des équipements plus limités pour les liaisons inter-satellites. En général, ces liaisons pourraient avoir une capacité en voies limitée. Ces systèmes «à court terme» auraient probablement les caractéristiques suivantes:

- espacement relativement petit entre satellites;
- capacité limitée;
- peu de systèmes en service;
- le minimum de répercussions sur les techniques spatiales actuelles: structure, pointage ou orientation, composants radioélectriques.

3. Considérations sur la conception des liaisons inter-satellites

Les éléments dont il faut tenir compte dans un projet de liaison inter-satellites sont les suivants:

- φ : espacement angulaire géocentrique entre satellites (degrés);
- f: fréquence (MHz);
- D: diamètre de l'antenne (mètres) avec ouverture circulaire équivalente correspondant à un rendement d'environ 55%;
- T: température de bruit du système de réception (K);
- p: puissance radioélectrique disponible (watts);
- b: largeur de bande nécessaire (Hz).

Sur la base de ces paramètres, on peut examiner la qualité de fonctionnement d'une liaison inter-satellites en fonction de son rapport porteuse/bruit avant détection, dont la valeur approchée est donnée par l'équation:

$$C/N = 3{,}72\ \frac{pD^4 f^2}{\varphi^2\, kTb}\ 10^{-18} \qquad (1)$$

où $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann. Cette équation est applicable dans le cas de petits espacements orbitaux. Si $\varphi > 10°$, il convient de remplacer le terme φ^2 par: $1{,}31 \times 10^4 \times \sin^2(\varphi/2)$.

Dans l'équation (1), la température de bruit du système de réception est une fonction de la fréquence. Aux fréquences de la bande des 6 GHz il est normal que les températures de bruit soient voisines de 1000 K; on peut donc poser:

$$T(f) \simeq 31{,}6\ (f/6)^{1/2} \qquad \text{K} \tag{2}$$

Dans un projet de système réel, les paramètres C/N et φ dépendent habituellement de certaines contraintes imposées au système; le premier paramètre est déterminé par la qualité de fonctionnement requise et le second par des considérations de brouillages mutuels entre satellites. Il est donc intéressant d'établir la relation entre les conditions requises pour la puissance et les dimensions de l'antenne dans les liaisons inter-satellites.

Le diagramme de la Fig. 1 représente la puissance relative disponible requise par unité de largeur de bande (p/b), en fonction de la fréquence, avec le diamètre de l'antenne pour paramètre, en dB par rapport à une valeur de référence arbitraire et pour des valeurs constantes de φ et C/N. Sont également représentées dans la Fig. 1 les valeurs de la largeur des faisceaux d'antenne de la liaison inter-satellites pour diverses combinaisons de D et de f. Dans le cas d'une liaison inter-satellites, un accroissement du diamètre des antennes entraîne une diminution de la puissance nécessaire en raison inverse de la quatrième puissance. A une augmentation du diamètre correspond une diminution de l'ouverture du faisceau, et les conditions requises pour le pointage mutuel entre satellites deviennent de plus en plus rigoureuses.

Par exemple, avec une puissance disponible de 20 W et un espacement entre satellites de 3°, une liaison inter-satellites à 54 GHz dans une bande large de 100 MHz, dont on suppose que le rapport porteuse/bruit est 30 dB, exigerait des antennes de 0,68 m de diamètre. L'ouverture angulaire du faisceau de ces antennes est d'environ 0,56°; pour utiliser la totalité de leur gain, la précision des pointages devrait être de 0,06°, soit le dixième de l'ouverture angulaire du faisceau. On a posé 30 dB comme valeur du rapport porteuse/bruit, dans l'hypothèse où le bruit sur la liaison inter-satellites n'aurait pas une influence notable sur la qualité de fonctionnement globale.

Il s'ensuit que l'emploi d'antennes de dimensions raisonnables en vue de réduire la puissance au minimum, à 54 GHz et aux fréquences supérieures, exigerait la mise en œuvre d'un système de poursuite mutuelle entre les satellites incorporant les techniques actuelles de stabilisation de l'orientation des engins spatiaux et d'adaptation des éléments orbitaux. La technologie de la poursuite et de l'orientation des faisceaux est assez avancée pour être appliquée aux fréquences optiques.

Quoi qu'il en soit, si l'on désire réduire au minimum la complexité des engins spatiaux et améliorer la fiabilité, il est intéressant d'examiner par exemple, dans le cas d'une application à INTELSAT, la possibilité de réaliser des liaisons inter-satellites exploitables sans poursuite mutuelle.

4. Liaisons inter-satellites sans poursuite

Si l'on considère des liaisons inter-satellites dans lesquelles les antennes ne se poursuivent pas mutuellement, il convient de tenir compte de deux paramètres supplémentaires:

ΔC : tolérance de variation du niveau du signal sur la liaison inter-satellites (dB);

δ : erreur sur le pointage de l'antenne imputable aux tolérances d'orientation relative de l'engin spatial (degrés).

L'Annexe I contient des bilans typiques d'erreurs de pointages «dans le plan» («in-plane») et «selon la normale au plan» («plane-normal»), ainsi que la marche à suivre pour les établir, pour des engins spatiaux nominalement géostationnaires. Dans l'état actuel de la technique, on peut obtenir des erreurs angulaires nettes comprises entre 0,5° et 1°.

Dans le cas d'une antenne à un seul dispositif d'alimentation, la diminution du gain dans le lobe de rayonnement principal due au décalage de l'orientation peut être obtenue approximativement par:

$$g(\theta)/g_0 \simeq 10^{-1{,}2\,(\theta/\theta_0)^2} \tag{3}$$

où θ est l'angle par rapport à la ligne de visée (en degrés) et θ_0 l'ouverture angulaire du faisceau aux points à demi-puissance, laquelle est fonction du diamètre D de l'antenne:

$$\theta_0 = \frac{2{,}14}{fD} \cdot 10^4 \qquad \text{degrés} \tag{4}$$

avec

f = en MHz et
D = en mètres

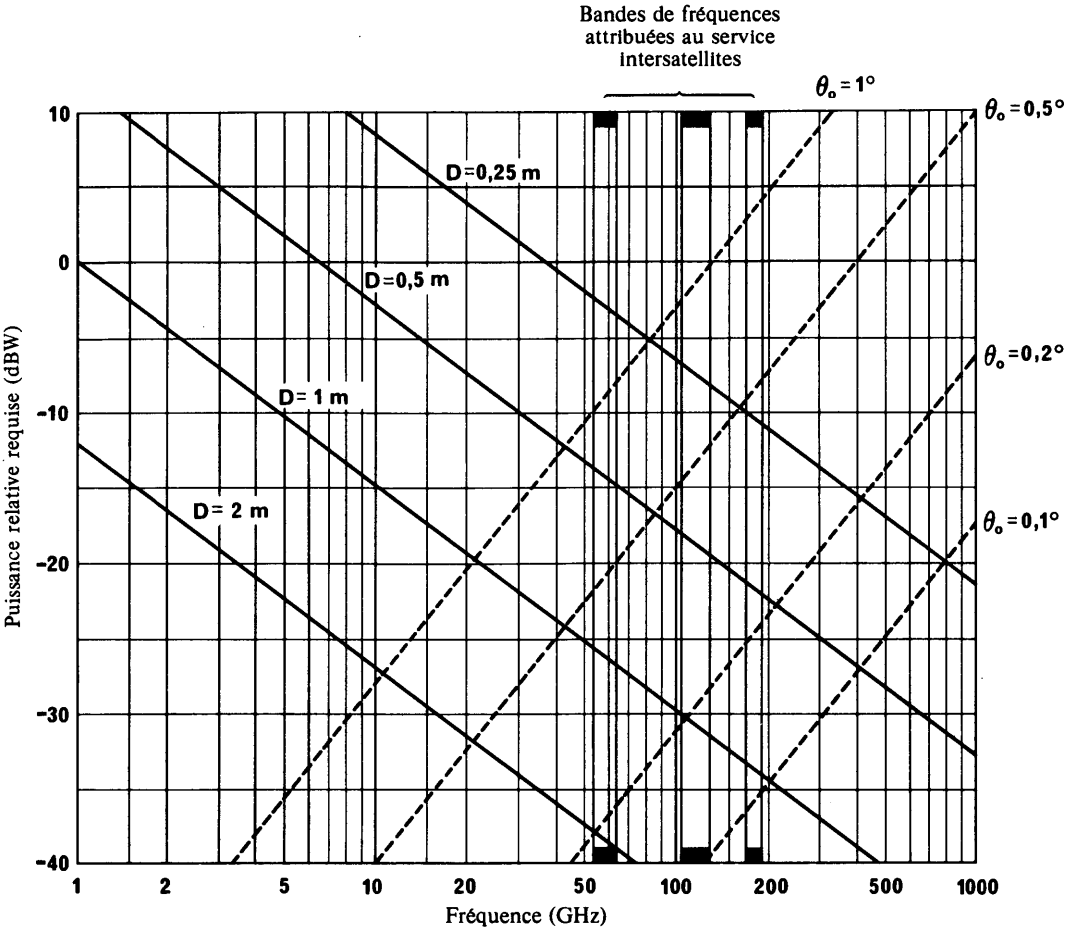


FIGURE 1 — *Puissance relative par unité de largeur de bande, requise pour une liaison intersatellites, en fonction de la fréquence correspondant à diverses valeurs du diamètre de l'antenne, en l'absence d'affaiblissements imputables à l'orientation ou à la poursuite*

D: diamètre de l'antenne

θ_0: ouverture angulaire du faisceau aux points à demi-puissance

Si l'on considère que l'incertitude sur le pointage entraîne une erreur de visée $\theta = \delta$ et que deux antennes sont en jeu, le gain de chacune pouvant varier entre g_0 et $g(\theta)$, on peut combiner les équations (3) et (4) pour obtenir:

$$20 \log (g/g_0) = \Delta C \approx 5{,}24 \, (\delta f D)^2 \, 10^{-8} \qquad \text{dB} \tag{5}$$

En combinant les équations (1) et (2), en résolvant la nouvelle expression pour obtenir le minimum de densité spectrale de puissance requise p/b et en introduisant l'équation (5) en tant qu'affaiblissement supplémentaire imputable aux erreurs sur le pointage, on obtient, en décibels:

$$10 \log (p/b) = P_0 = C/N + 20 \log \varphi - 15 \log f - 40 \log D + \\ + 5{,}24 \, (\delta f D)^2 \, 10^{-8} - 43{,}2 \qquad \text{dB(W/Hz)} \tag{6}$$

Le diagramme de la Fig. 2, tracé pour P_0 en fonction de f, avec $\delta = 0{,}5°$ et $\delta = 1°$, et avec des diamètres d'antenne D de 0,25, 0,5, 1 et 2 mètres, montre que les conditions de puissance minimale peuvent être remplies aux fréquences inférieures à 54 GHz, fréquence la plus basse actuellement attribuée au service inter-satellites. Pour le tracé de ce diagramme, on a pris une valeur de référence arbitraire pour P_0 et on a considéré que C/N et φ sont des constantes du système. La possibilité d'exploiter une liaison inter-satellites en utilisant une fréquence aussi voisine que possible de la fréquence optimale (c'est-à-dire la fréquence qui correspond au minimum de P_0) dépend de la tolérance ΔC que l'on est disposé à accepter pour la variation du niveau du signal. Les valeurs limites pour $\Delta C = 1$ dB et 2 dB sont données par la Fig. 2. La fréquence optimale effective est celle qui correspond aux points d'intersection des courbes de P_0 et de ΔC. Les conditions de puissance minimale absolue sont remplies lorsque $\Delta C = 3{,}4$ dB environ; il n'y a donc aucun avantage à gagner en tolérant une variation du niveau du signal plus grande que 3 dB environ.

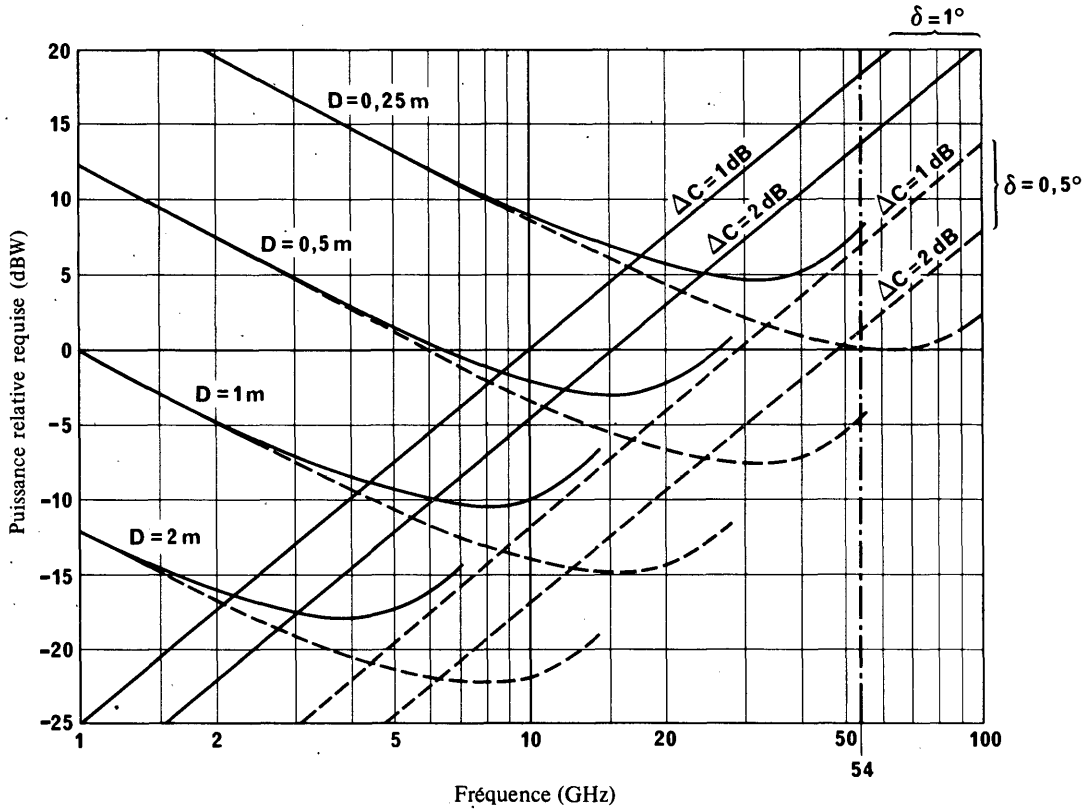


FIGURE 2 — *Puissance relative requise pour une liaison intersatellites sans poursuite, en fonction de la fréquence. Paramètres: diamètre de l'antenne (D), erreur nette sur le pointage (δ) et tolérance de variation du niveau du signal (ΔC)*

——— δ = 1°
– – – – δ = 0,5°

Les considérations qui précèdent indiquent que, pour des antennes de diamètre supérieur à 0,25 m, les fréquences optimales pour les liaisons inter-satellites, sans poursuite entre des satellites très peu espacés, peuvent être inférieures à 54 GHz, car plus le diamètre des antennes est grand, plus la fréquence optimale est basse.

5. Réutilisation des fréquences entre liaisons inter-satellites utilisant des antennes de poursuite

L'Annexe II au présent Rapport donne les résultats et les conclusions d'une analyse, concernant la mesure dans laquelle les liaisons inter-satellites, entre satellites géostationnaires, peuvent réutiliser les mêmes fréquences. Cette analyse repose sur un certain nombre d'hypothèses.

6. Choix des fréquences pour les liaisons inter-satellites

Les liaisons inter-satellites fonctionnant entre des satellites de télécommunications géostationnaires peuvent être réparties en deux catégories:

a) liaisons entre satellites très espacés sur l'orbite (par exemple 60°) destinées à élargir la zone de couverture géographique d'un système sans utiliser une station terrienne comme relais;

b) liaisons entre satellites relativement voisins (espacement orbital de 3° à 5° par exemple) et ayant pratiquement la même zone de couverture, mais desservant des groupes de stations terriennes différents.

On se propose d'examiner dans ce qui suit les caractéristiques techniques optimales pour ces deux types de liaisons, lesquelles seraient normalement fort différentes.

6.1 *Liaisons inter-satellites de grande longueur*

L'affaiblissement de propagation entre satellites, dans le cas des liaisons de la catégorie a), sera élevé et comparable à celui d'une liaison entre un satellite géostationnaire et la Terre; pour maintenir la puissance de l'émetteur du satellite à une valeur acceptable, il sera donc nécessaire d'utiliser des antennes d'émission et de réception à gain élevé. Pour un diamètre d'antenne maximal de 1,2 m imposé par les dimensions de la coiffe du

lanceur du satellite, un gain élevé correspondrait à l'utilisation d'une fréquence aussi élevée que possible, généralement au-dessus de 20 GHz et, de préférence, dans la bande de 54,25 à 58,2 GHz déjà attribuée au service inter-satellites. Si les erreurs de maintien en position et l'inclinaison orbitale sont maintenues dans des limites étroites, mais réalisables avec la technique actuelle, les variations de la direction d'un satellite par rapport à l'autre seront très petites, étant donné les grandes distances de séparation que ces systèmes impliquent; cela n'empêcherait pas l'emploi d'antennes à faisceau étroit même en l'absence de dispositifs de poursuite.

6.2 *Liaisons inter-satellites à courte distance*

Pour les liaisons à courte distance de la catégorie b), la proximité relative des satellites entraîne de grandes variations angulaires du trajet lorsque l'inclinaison orbitale varie très peu. Par exemple, la variation angulaire maximale du trajet entre deux satellites, espacés de 4° et ayant chacun une tolérance d'inclinaison orbitale de ± 0,1°, sera:

$$2 \text{ arc tg } \frac{0{,}2}{4} = 5{,}7^\circ$$

Il s'agit là du cas le plus défavorable où les déplacements en latitude des deux satellites sont en totale opposition de phase. On pourrait normalement prévenir une pareille situation en choisissant judicieusement les paramètres orbitaux et l'on pourrait, ainsi qu'il est démontré dans l'Annexe I, réduire la variation angulaire à ± 1°. Si l'on disposait d'un système de poursuite d'antenne, on pourrait utiliser des antennes à gain élevé pour les liaisons inter-satellites à courte distance. Un tel système impliquerait toutefois que le satellite soit pourvu de dispositifs assez perfectionnés, fiables et de faible poids, probablement difficiles à réaliser couramment. Il serait donc nécessaire d'utiliser des antennes dont l'ouverture de faisceau serait, dans le cas de l'exemple ci-dessus, égale à 2,0°, plus une tolérance de 0,15° par exemple pour tenir compte des erreurs d'orientation des satellites.

Ces résultats, ainsi que la Fig. 2, montrent que des fréquences de l'ordre de 10 GHz seraient les fréquences les plus appropriées pour les antennes de 1 m de diamètre qui ne servent pas à la poursuite. Si, par le moyen d'un système de poursuite d'antenne, on pouvait réduire la variation angulaire pour qu'elle ne représente plus qu'une fraction de degré, l'optimum se situerait entre 20 et 30 GHz. L'utilisation d'antennes plus petites pourrait, dans une certaine mesure, diminuer les difficultés de la poursuite, mais il faudrait une puissance d'émission beaucoup plus grande.

Il ne serait pas possible, pour des raisons de brouillage, d'utiliser pour les liaisons inter-satellites des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite pour les liaisons espace vers Terre ou Terre vers espace. Toutefois, comme la direction des trajets de transmission inter-satellites sera très écartée de la Terre, il se peut que le partage des fréquences entre services inter-satellites et services de Terre ne pose pas de problèmes; cette question est examinée dans le Rapport 387.

6.3 *Technologie des équipements*

On dispose maintenant pour les bandes 11/14 et 20/30 GHz d'une technologie qui est bien au point pour les stations spatiales. Il serait hautement souhaitable que ces appareils qui ont fait leurs preuves dans l'espace, ou des appareils similaires, soient adaptés aux liaisons inter-satellites. Les fréquences supérieures à 50 GHz risquent d'être trop élevées pour pouvoir être exploitées dans l'avenir proche.

6.4 *Problèmes de brouillage et de coordination*

On a dégagé les grands problèmes suivants:

- le service inter-satellites exigera le mode d'exploitation duplex. Il faudra en conséquence prévoir des couples de bandes d'égale largeur, séparées par un intervalle de fréquences;
- les fréquences des bandes inter-satellites devront être assez écartées de celles des bandes des liaisons montante et descendante. Il est en outre souhaitable que deux quelconques de ces bandes soient assez éloignées l'une de l'autre pour réduire au minimum les problèmes de brouillage. Une fréquence inter-satellites est utilisée à l'émission par un satellite et à la réception par un autre satellite. Si les fréquences des liaisons montante et descendante sont très voisines de celle de la liaison inter-satellites, il peut se produire de très grandes différences de niveau entre un émetteur et un récepteur utilisant des fréquences adjacentes. Cela conduit à de très strictes conditions de séparation à bord du satellite, des conditions si strictes qu'il faudra laisser inutilisée une partie des bandes pour bien séparer les fréquences d'émission des fréquences de réception;
- en règle générale, les bandes de fréquences inter-satellites ne doivent pas être partagées avec d'autres services par satellite. Elles peuvent, cependant, être utilisées en partage avec des services de Terre. Voir le Rapport 791;
- les faisceaux de rayonnement de toutes les liaisons inter-satellites seraient dirigés dans le plan de l'orbite des satellites géostationnaires et il se peut que l'écart angulaire entre les faisceaux de liaisons inter-satellites appartenant à des systèmes différents ne soit pas plus grand que l'écart angulaire entre satellites adjacents. Afin de réaliser la réutilisation des fréquences dans la portion du spectre des fréquences attribuée au service inter-satellites, il sera nécessaire, en ce qui concerne les applications des liaisons inter-satellites, de concevoir des faisceaux dont l'ouverture soit très étroite, les lobes latéraux d'antenne de bas niveau et une haute précision dans le pointage des antennes. Il est clair, d'autre part, qu'on devra mettre au point des méthodes et des critères pour coordonner les fréquences assignées aux liaisons inter-satellites.

7. Conclusions

D'après ce qui précède, on peut raisonnablement s'attendre que les liaisons inter-satellites susciteront un intérêt de plus en plus grand. Quelques-uns des principaux aspects techniques qui sont reconnus comme demandant un complément d'étude sont les suivants:

- conception et spécification des caractéristiques de transmission, de la technologie et de la réalisation des liaisons inter-satellites;
- dispositions à prendre en ce qui concerne les liaisons de jonction interorbitales; conception et technologie de la commutation;
- effets sur les conditions de construction des satellites du point de vue mécanique.

On peut prévoir une demande pour des liaisons inter-satellites courtes destinées à fournir des moyens d'interconnexion des réseaux de télécommunication par satellites bien en dessous de la fréquence la plus basse attribuée au service inter-satellites et, de préférence, entre 15 et 35 GHz.

BIBLIOGRAPHIE

KURAKOV, P. S. [1980] Vybor parametrov mezhsputnikovoi linii svyazi (Choix des paramètres d'une liaison inter-satellites) *Elektrosviaz*, **2**, 11-14.

ANNEXE I

CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES ET ERREURS SUR LE POINTAGE DES ANTENNES NON ORIENTABLES DANS UNE LIAISON INTER-SATELLITES

Dans une liaison inter-satellites, on suppose que les antennes de chaque station spatiale sont fixées sur une plate-forme à stabilisation gyroscopique et réglées initialement de manière que chaque station spatiale soit située au centre du diagramme de rayonnement de l'antenne de l'autre station spatiale, dans des conditions normales d'une orbite synchrone. Les erreurs de pointage imputables aux écarts par rapport aux conditions nominales sont classées, dans les Tableaux I et II, en composantes «dans le plan» («in-plane») et composantes «hors plan» («out-of-plane»). L'erreur totale est donnée par la somme quadratique des deux composantes; elle affecte chaque satellite indépendamment de l'autre.

Les erreurs angulaires de pointage imputables au mouvement orbital sont fonction de l'espacement nominal en longitude entre les satellites. L'erreur de position «dans le plan» comprend une erreur dans le sens de la trajectoire («in-track error»), due à une variation de l'espacement longitudinal par rapport à l'espacement nominal, et une erreur «en travers de la trajectoire» («cross-track error») imputable au fait que l'un des satellites ou même les deux ne sont pas à leur altitude nominale. L'erreur «hors plan» est due au fait que le mouvement ne se fait pas dans le même plan. On suppose que ces erreurs sont la conséquence des tolérances admises pour les éléments orbitaux et non pas des incertitudes statistiques quant aux positions prises par chaque satellite.

L'erreur sur la position dans le sens de la trajectoire contribue relativement peu à l'erreur angulaire sur le pointage puisqu'elle est égale à la moitié de l'erreur admissible sur l'espacement entre satellites. Si on prend toutes les précautions voulues, une tolérance d'espacement de $\pm$ 0,1° peut être maintenue moyennant une faible dépense supplémentaire de propergol au-delà de celle qui est nécessaire pour le maintien normal en position est-ouest et grâce à une attention particulière. De plus, cette tolérance est assez large pour permettre une certaine souplesse dans le programme de manœuvres individuelles.

L'erreur «en travers de la trajectoire» («cross-track error») provient de ce qu'aucun satellite ne peut être maintenu sur une orbite parfaitement circulaire sans corrections journalières de sa vitesse de déplacement. Par conséquent, l'altitude de chaque satellite variera en vingt-quatre heures autour d'une valeur moyenne. L'altitude moyenne de chaque satellite sera à peu près la même du fait que son mouvement est-ouest est presque en phase, mais les variations individuelles auront en général des amplitudes et une phase différentes.

On a les moyens d'agir sur les amplitudes des variations individuelles de l'altitude, ou sur leur phase, de manière que l'erreur de position «en travers de la trajectoire» ne dépasse jamais quelques kilomètres. Mais il faudrait procéder à des corrections supplémentaires de la vitesse de déplacement en présence d'un couplage de vitesse «dans le plan» par suite de manœuvres nord-sud, et coordonner étroitement les manœuvres est-ouest normales des deux satellites. On estime que, sans avoir recours à ces complications supplémentaires, il est possible de maintenir à moins de 12 km l'erreur sur la position.

L'erreur de pointage «hors plan» se produit si les deux satellites ne se déplacent pas exactement dans le même plan. On estime que l'erreur sur la position peut être maintenue à moins de 8 km, ce qui correspond à un angle d'environ 0,01° entre les plans de chaque orbite. Cette erreur reflète l'incertitude des corrections de vitesse qui découle des manœuvres individuelles de maintien en position nord-sud effectuées sur chaque satellite.

Chaque manœuvre de maintien en position nord-sud modifiera de 0,2° l'orientation par inertie de chaque plan d'orbite. Afin de conserver à peu près la même orientation relative, il faut coordonner étroitement les manœuvres individuelles. Pour un espacement en longitude de 3° entre satellites, les manœuvres doivent être effectuées à 12 minutes au plus l'une de l'autre (ce qui équivaut à 4 minutes par degré d'espacement en longitude).

Erreur sur le pointage

Les divers éléments du bilan d'erreur sur le pointage ont été réduits à une seule valeur effective par application de la règle suivante:

- On fait la somme algébrique de toutes les erreurs «dans le plan» («in-plane errors») sur une longue période de temps, ce qui donne une seule valeur. On procède de la même manière pour les erreurs «en travers du plan» («cross-plane errors») sur une longue période.
- On fait la somme quadratique des erreurs «dans le plan» et «en travers du plan» sur une longue période, ce qui donne une seule valeur pour les erreurs sur une longue période. Etant donné que les erreurs sont égales et supposées sans corrélation, la somme quadratique des erreurs sur une longue période est circulaire.
- On fait la somme algébrique des erreurs «dans le plan» sur une courte période de temps. On procède de même pour les erreurs «en travers du plan» sur une courte période.
- On fait la somme quadratique des erreurs «dans le plan» et «en travers du plan» et de l'erreur quadratique sur une longue période, ce qui donne l'erreur totale sur le pointage.
- Etant donné que chaque terme de la somme totale pris individuellement est une faible probabilité, nominalement trois écarts types (3σ), l'erreur totale sur le pointage est de même une faible probabilité, nominalement 3σ.

Appliquée aux bilans d'erreur indiqués ci-dessus, cette règle permet d'obtenir l'erreur totale pour diverses valeurs de l'espacement entre satellites, comme l'indique le Tableau III dans lequel figurent les erreurs de pointage qui ont été utilisées pour évaluer la qualité de fonctionnement de la liaison.

TABLEAU I — *Erreurs sur le pointage «dans le plan»*

Source d'erreur	Ordre de grandeur de l'erreur
1. *Variation sur une longue période*	
Distorsion thermique de l'antenne	± 0,02°
Erreur sur la position «dans le sens de la trajectoire»	± 0,05°
Erreur sur la position «en travers de la trajectoire» :	
Espacement nominal en longitude :	
2°	± 0,47°
3°	± 0,31°
4°	± 0,23°
5°	± 0,19°
2. *Erreur systématique*	± 0,20°
3. *Variation sur une courte période*	
Orientation de la plate-forme à stabilisation gyroscopique	± 0,25°

TABLEAU II — *Erreurs sur le pointage «hors plan»*

Source d'erreur	Ordre de grandeur de l'erreur
1. *Variation sur une longue période*	
Distorsion thermique de l'antenne	± 0,04°
Incertitude sur l'orientation	± 0,01°
Précession de l'orientation par rapport à la normale à l'orbite	⩽ 0,10°
Erreur sur la position «hors plan» :	
Espacement nominal en longitude :	
2°	± 0,31°
3°	± 0,21°
4°	± 0,15°
5°	± 0,12°
2. *Erreur systématique*	
Alignement mécanique	± 0,20°
3. *Variation sur une courte période*	
Vacillation du mouvement de rotation et nutation	± 0,06°

TABLEAU III — *Erreur sur le pointage en fonction de l'espacement entre satellites*

Espacement	Erreur effective sur le pointage
2°	1,01°
3°	0,833°
4°	0,739°
5°	0,693°

On suppose que l'erreur totale effective est circulaire, bien qu'il n'en soit pas précisément ainsi. La commodité que procure cette hypothèse pour le calcul compense la légère erreur qui en découle.

ANNEXE II

RÉUTILISATION DES FRÉQUENCES SUR DES LIAISONS INTER-SATELLITES (GÉOSTATIONNAIRES) UTILISANT DES ANTENNES DE POURSUITE

1. Introduction

Le service inter-satellites est appelé à connaître un développement important, pour lequel on devra avoir recours à des antennes de poursuite à effets réciproques installées à bord de différentes stations spatiales reliées entre elles.

En admettant le principe de l'utilisation sur une vaste échelle des liaisons inter-satellites entre satellites géostationnaires, il faut déterminer le nombre de liaisons de ce type qui pourront utiliser en partage les mêmes fréquences ainsi que les facteurs influant sur les possibilités de réutilisation des fréquences dans le service inter-satellites.

2. Définition de la liaison

Une liaison entre satellites géostationnaires comporte deux stations spatiales géostationnaires séparées par un espacement angulaire géocentrique θ; chacune d'elles a une antenne d'émission et de réception à gain élevé (il peut s'agir de la même antenne) dont les faisceaux principaux sont pointés vers l'autre station spatiale. Le pointage est maintenu par poursuite, avec une erreur négligeable. On admet que les bandes de fréquences à l'émission dans les sens est-ouest et ouest-est sont différentes, tout en étant suffisamment voisines pour que les gains d'antenne et les affaiblissements sur le trajet soient les mêmes pour les deux, ($|f_1 - f_2| \ll f_1$). On suppose en outre que le paramètre de qualité (C/N) est le même dans les deux sens, tout comme le rapport de protection requis (rapport porteuse/brouillage (C/I)) contre les brouillages imputables aux émissions d'autres liaisons inter-satellites.

On part de l'hypothèse que les diagrammes des antennes d'émission et de réception sont identiques et décrits par l'expression suivante:

$$\left.\begin{aligned} g(\xi) &= 6750\,\varphi_0^{-2}\left[1 + \left(\frac{\xi}{\varphi_0}\right)^{2,5}\right]^{-1} \\ g(\xi) &= 0{,}1 \end{aligned}\right\} \quad \text{on retiendra la plus élevée de ces valeurs} \qquad (7)$$

où $2\varphi_0$ est l'ouverture à mi-puissance du faisceau des antennes d'émission et de réception, et ξ l'angle par rapport à l'axe du faisceau principal (angle de discrimination).

3. Brouillage entre liaisons inter-satellites courtes identiques

Considérons tout d'abord le cas simple de liaisons inter-satellites identiques courtes (homogènes). Deux de ces liaisons peuvent être disposées de quatre façons différentes, comme indiqué à la Fig. 3, qui montre aussi les divers trajets de brouillage possibles.

3.1 *Assignations de fréquences transmises en sens opposé*

Il est possible que les fréquences assignées à deux liaisons inter-satellites données soient groupées par paires et servent à des transmissions faites en sens opposé (Fig. 3a) et b)). Pour ces configurations, une analyse détaillée montre que l'espacement, exprimé en fonction de l'angle géocentrique θ', entre les deux satellites «de gauche» de chaque liaison peut être très petit; pour des hypothèses appropriées concernant l'excentricité de l'orbite, et une isolation de l'ordre de 30 dB, il correspond généralement à un arc inférieur à 1°. On démontre aussi, sur la base de ces hypothèses, qu'une station spatiale peut être le point de départ d'une liaison vers l'est et d'une liaison vers l'ouest, avec les mêmes fréquences.

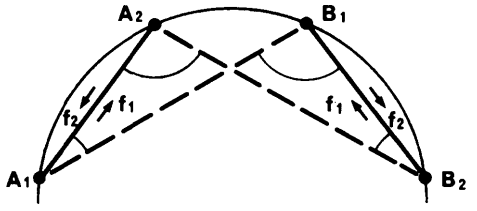
Lorsqu'il s'agit de plus de deux liaisons inter-satellites avec assignations de fréquences transmises en sens opposé sur l'orbite, une liaison sur deux aura nécessairement des fréquences assignées transmises dans le même sens.

3.2 *Assignations de fréquences transmises dans le même sens*

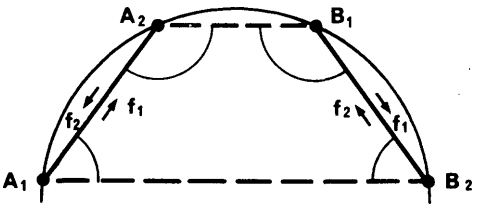
Ce cas correspond à la configuration représentée dans les Fig. 3c) et 3d). Lorsque cette configuration comporte plus de deux liaisons, on démontre que l'angle de séparation des liaisons θ', est une fonction de la «longueur» θ des liaisons, de l'ouverture de faisceau des antennes de la liaison inter-satelites $2\varphi_0$, de l'isolation nécessaire C/I et de l'écart radial maximal, Δh, des stations spatiales par rapport à l'altitude nominale de l'orbite (lui-même fonction de l'excentricité de l'orbite et du taux de dérive maximal est-ouest entre les manœuvres de maintien en position). Les valeurs représentatives actuellement réalisables pour Δh se situent entre 15 et 100 km.

Une analyse détaillée montre qu'il existe une «longueur» de liaison minimale θ, qui permet d'intercaler ces liaisons; voir la Fig. 3d). Par ailleurs, plus grande est la «longueur» θ de la liaison, plus grand est le nombre des liaisons inter-satellites identiques qui peuvent avoir leur origine en un point de l'arc occupé par une liaison quelconque. La Fig. 4 donne les valeurs de la «longueur» de liaison de coupure pour la configuration intercalée, ainsi que le nombre des liaisons intercalées n qui peuvent avoir leur origine en un point de l'arc occupé par une liaison.

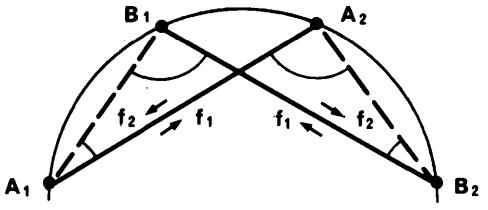
Des liaisons dans le même sens, non intercalées, peuvent être établies de bout en bout mais cela nécessite un espacement non nul entre les satellites adjacents, sauf dans le cas des liaisons de très petite «longueur», pour lesquelles cet espacement doit augmenter quand la «longueur» diminue.



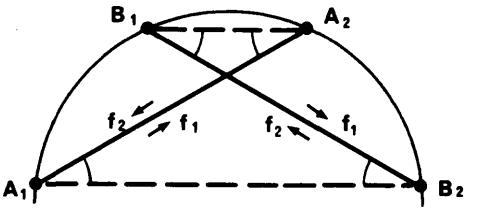
a) Fréquences transmises en sens opposé; liaisons séparées sur l'orbite.



c) Fréquences transmises dans le même sens; liaisons séparées.



b) Fréquences transmises en sens opposé; liaisons intercalées.



d) Fréquences transmises dans le même sens; liaisons intercalées.

FIGURE 3 — *Relations géométriques pour le brouillage entre liaisons inter-satellites*

(Les angles indiqués sont les angles de discrimination d'antenne; les trajets de brouillage sont représentés par des traits interrompus.)

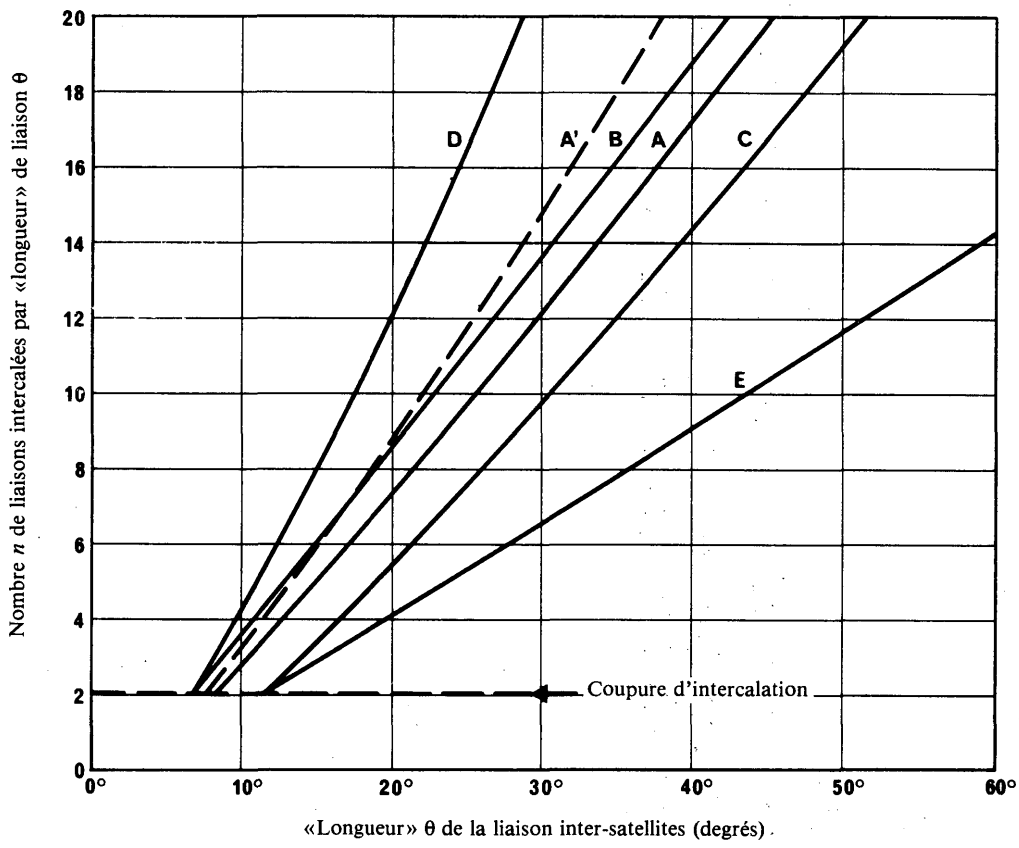


FIGURE 4 — *Nombre n de liaisons intercalées par «longueur» de liaisons θ, en fonction de la «longueur» de la liaison, pour différentes combinaisons de φ_0, Δh et C/I*

A: $\varphi_0 = 0{,}25°$; $\Delta h = 40$ km
B: $\varphi_0 = 0{,}25°$; $\Delta h = 15$ km
C: $\varphi_0 = 0{,}25°$; $\Delta h = 100$ km
D: $\varphi_0 = 0{,}125°$; $\Delta h = 40$ km
E: $\varphi_0 = 0{,}5°$; $\Delta h = 40$ km
A': comme A, mais avec $C/I = 25$ dB

4. Utilisation de l'orbite par des liaisons inter-satellites identiques courtes

La Fig. 5 illustre la relation qui existe entre la «longueur» de la liaison et le nombre des liaisons pouvant être placées sur la totalité de l'orbite des satellites géostationnaires (ordonnée de droite), en fonction de deux paramètres. L'ordonnée de gauche donne la densité relative des réutilisations de fréquences (utilisation de l'orbite) par rapport à une valeur de référence arbitraire. Les portions de courbes situées à gauche des discontinuités verticales les plus importantes se rapportent à des liaisons non intercalées; celles de droite concernent des liaisons intercalées de plus en plus rapprochées les unes des autres. En réalité, ces courbes sont composées d'échelons successifs qui correspondent à l'augmentation due à chaque liaison. Cela a été représenté sur une des courbes; pour toutes les autres, on a représenté seulement les enveloppes des échelons.

5. Liaisons inter-satellites non identiques

On démontre que, dans un groupe existant de liaisons courtes, il est possible d'ajouter des groupes supplémentaires de liaisons comme le montre la Fig. 6. Pour cela, les liaisons des groupes supplémentaires doivent être suffisamment longues pour que l'on obtienne l'isolation nécessaire par rapport à celles du groupe initial. Chaque nouveau groupe augmente le rendement d'utilisation de l'orbite d'une quantité qui correspond au groupe initial de liaisons «courtes», jusqu'à ce que l'on atteigne des longueurs de liaison qui commencent à «intercepter» la Terre (correspondant à un arc de 160° environ).

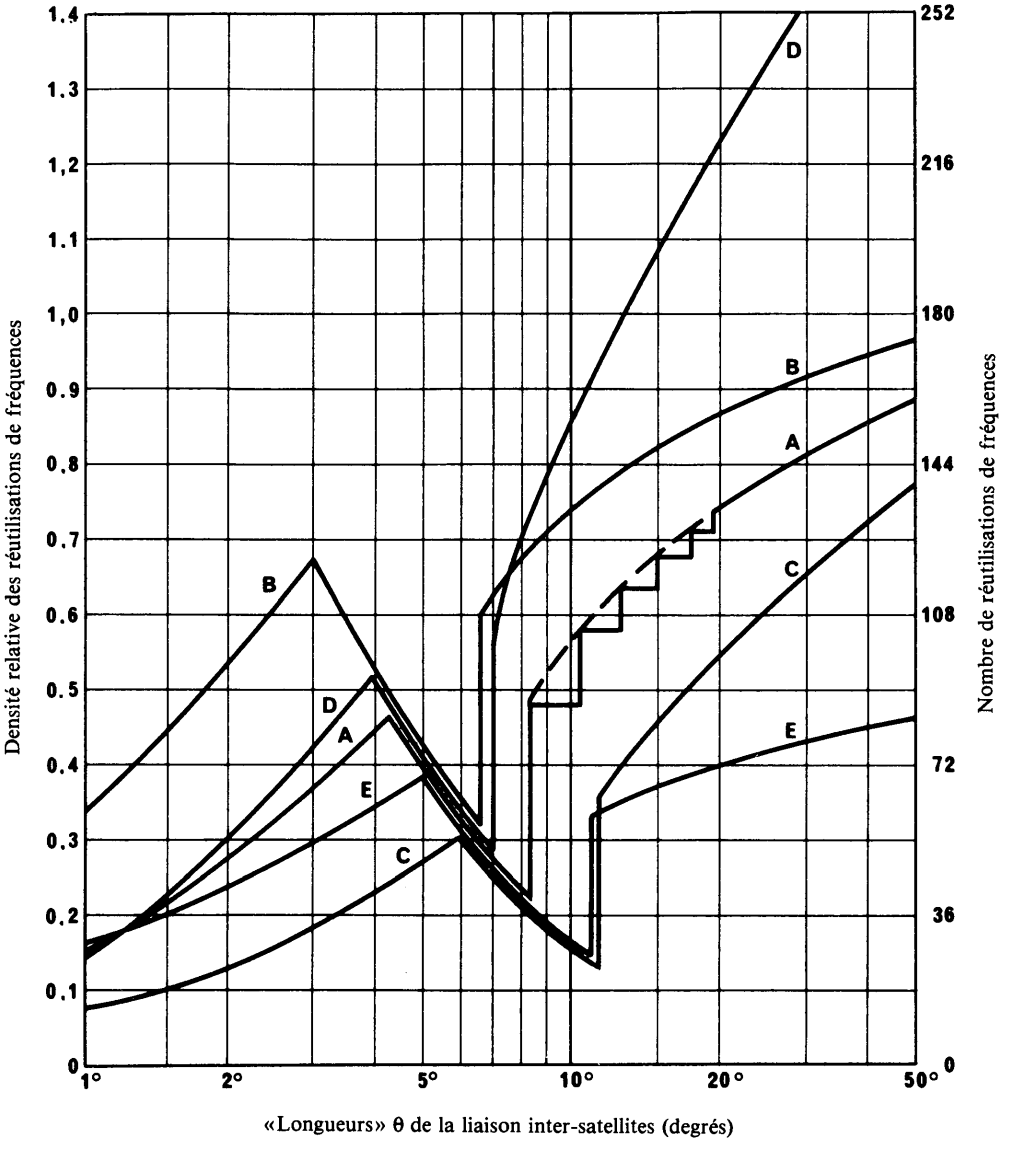


FIGURE 5 — *Densité maximale relative des réutilisations de fréquences (utilisation de l'orbite) pour des liaisons inter-satellites identiques, en fonction de la «longueur» θ de la liaison, pour différentes combinaisons de φ_0 et Δh*

A: φ_0 = 0,25°; Δh = 40 km
B: φ_0 = 0,25°; Δh = 15 km
C: φ_0 = 0,25°; Δh = 100 km
D: φ_0 = 0,125°; Δh = 40 km
E: φ_0 = 0,5°; Δh = 40 km

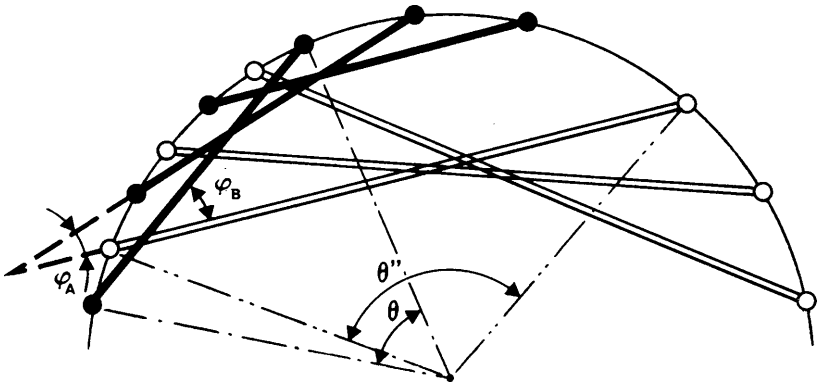


FIGURE 6 — *Relations géométriques pour deux groupes de liaisons intercalées («longueurs» respectives θ et θ'')*

6. Conclusions

Une étude préliminaire de la possibilité de réutilisation des fréquences dans le service inter-satellites, sur l'orbite des satellites géostationnaires, conduit aux conclusions provisoires suivantes:

- La possibilité de réutilisation des fréquences dans les liaisons entre satellites géostationnaires est grande; elle peut permettre la mise en place de plusieurs centaines de liaisons inter-satellites dans des limites de brouillages acceptables.
- Les principaux facteurs dont dépend cette possibilité de réutilisation des fréquences sont la discrimination des lobes latéraux des antennes et l'ellipticité de l'orbite. On constate en effet que cette possibilité augmente s'il y a une forte discrimination des lobes latéraux (faisceaux d'antenne étroits et/ou lobes latéraux à décroissance rapide) et lorsque les orbites ont une faible ellipticité (orbites très sensiblement circulaires).
- On a observé en particulier qu'il ne peut y avoir de chevauchement entre des liaisons inter-satellites très courtes avec assignations de fréquences de même sens, par exemple celles qui pourraient intéresser spécialement les premiers utilisateurs du service inter-satellites. Pour les liaisons inter-satellites identiques, la plus petite longueur qui permettrait un tel chevauchement dépend de la discrimination d'antenne et de l'ellipticité de l'orbite: plus la discrimination est forte et l'ellipticité faible, plus petite sera la longueur de liaison pour laquelle le chevauchement est possible.
- L'utilisation de plusieurs groupes de liaisons inter-satellites de longueurs suffisamment différentes permet de multiplier le rendement de réutilisation des fréquences par rapport à la valeur réalisable avec un seul groupe de liaisons courtes identiques.

On n'a pas examiné ici le problème de la réutilisation des fréquences sur les liaisons inter-satellites reliant les stations spatiales faisant partie d'un «amas» (c'est-à-dire des stations qui sont éclairées par le faisceau principal d'une station terrienne). La réutilisation des fréquences à l'intérieur d'un amas de liaisons et entre des amas de liaisons différents devra faire l'objet d'un complément d'étude.

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/55 (Etats-Unis d'Amérique).

RAPPORT 552-2

UTILISATION DES BANDES DE FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz PAR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2H/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Dans le présent Rapport on se propose d'examiner, à titre préliminaire, quelques-uns des facteurs techniques qu'il convient de considérer dans l'établissement des projets de systèmes du service fixe par satellite destinés à fonctionner dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz environ. Comme l'étendue des bandes

attribuées est généralement plus grande aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, l'emploi de ces fréquences faciliterait la réalisation de systèmes de grande capacité. Plus spécialement, l'utilisation des bandes 30/20 GHz, faciliterait la réalisation de systèmes de très grande capacité employant des antennes à faisceau étroit.

Les points examinés dans le présent Rapport sont les suivants:

- choix de la configuration des systèmes;
- le partage des fréquences avec les systèmes de Terre;
- considérations relatives à la conception des systèmes du service fixe par satellite.

2. Choix de la configuration des systèmes

La diffusion et l'absorption par les nuages et par les précipitations augmentent rapidement aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, ce qui rend bien plus difficile la réalisation des systèmes considérés. Il est presque impossible, si l'on ne fait pas appel à des techniques spéciales, d'obtenir les grandes marges de protection contre les précipitations qui sont nécessaires pour satisfaire aux normes de qualité.

Quatre méthodes sont utilisables pour éliminer les graves effets des précipitations aux fréquences élevées:

a) la réception en diversité d'emplacement;

b) le remplacement de la bande de fréquences normalement utilisée, en cas de besoin, par une bande de fréquences inférieure, bien moins sensible aux effets des précipitations;

c) l'utilisation de systèmes adaptatifs, qui modifient les caractéristiques de transmission en fonction des variations de conditions de propagation;

d) l'utilisation à bord du satellite d'antennes à faisceaux étroits multiples, avec application possible à la configuration à une seule station par faisceau (SSPB = single station per beam).

Dans la première méthode précitée, a), on peut tirer parti du fait que pour des stations terriennes séparées par une distance appropriée (de 10 à 30 km), les précipitations qui les affectent chacune ont entre elles une corrélation presque négligeable, et la probabilité pour que les deux stations soient affectées simultanément par une forte pluie est très petite. La méthode consiste à connecter ensemble les deux stations terriennes assurant la diversité par une ligne de transmission insensible aux précipitations et à utiliser pour le service la station terrienne la moins affectée des deux. Le fonctionnement en diversité est décrit en détail dans l'Annexe I.

Pour appliquer la deuxième méthode mentionnée en b) ci-dessus, on suppose que, dans le système, plusieurs stations terriennes fonctionnent normalement à des fréquences très sensibles aux précipitations, c'est-à-dire qui sont supérieures à 10 GHz environ. Comme il est peu probable que plusieurs stations terriennes soient affectées simultanément, quand une station est fortement perturbée par une précipitation, on la commute sur une bande de fréquences inférieure.

Dans la troisième méthode mentionnée en c) ci-dessus, on peut améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes numériques en réduisant la vitesse de transmission de l'information quand les conditions de propagation sont mauvaises, ou en augmentant la puissance d'émission (régulation de puissance sur la liaison montante). Des exemples de cette dernière solution sont illustrés dans les Annexes II et III.

L'objectif de la quatrième méthode mentionnée sous d) est d'éviter les difficultés au niveau de la conception et de l'exploitation des stations terriennes, même s'il faut pour cela augmenter la complexité du satellite en utilisant des antennes embarquées à faisceaux étroits multiples qui permettent d'améliorer la p.i.r.e. et le facteur G/T du satellite pour compenser les effets de propagation.

3. Partage des fréquences avec des systèmes de Terre

Aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, les variations des niveaux des signaux utiles et brouilleurs (tels que modifiés par des précipitations) et les phénomènes de diffusion ont une plus grande influence sur la distance de séparation minimale qu'on peut obtenir entre des stations terriennes du service fixe par satellite et des stations de Terre du service fixe.

On peut pallier les effets de la diffusion en choisissant avec soin les emplacements des stations de manière à éviter l'intersection des faisceaux des deux systèmes et en utilisant une discrimination par polarisations croisées, dans le cadre d'ondes à polarisation plane; d'ailleurs, comme l'affaiblissement de transmission sur un trajet donné augmente avec la fréquence, la distance de séparation entre les stations des deux systèmes peut être moindre aux fréquences plus élevées. En choisissant des emplacements tels que l'on obtienne un espacement angulaire de plus de 20 à 30 degrés entre une station terrienne et des stations de Terre, on peut réduire de quelques kilomètres la distance minimale de séparation et prévenir dans une certaine mesure les effets des fluctuations des niveaux des signaux utiles et des signaux brouilleurs qui sont causées par la différence entre les affaiblissements dus aux précipitations dans les deux systèmes.

4. Conception des systèmes du service fixe par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz

Pour des systèmes du service fixe par satellite qui utilisent des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, les effets des hydrométéores, notamment ceux des précipitations pluviales, sont particulièrement importants et il faut en tenir compte lors de l'étude d'un système. La méthode la plus sûre pour évaluer les effets des précipitations peut consister à prendre pour base de calculs les distributions observées de l'affaiblissement dû aux précipitations en fonction du temps. Ces distributions varient en fonction de la fréquence et de la saison; elles dépendent des conditions climatiques prévalant à l'emplacement de la station terrienne, ainsi que de l'angle sous lequel le satellite est visible.

Il faut aussi tenir compte du fait que la corrélation entre les affaiblissements sur les trajets d'une liaison par satellite diminue quand la distance entre les stations terriennes augmente et quand l'intensité des précipitations augmente également. Un autre facteur de décorrélation est la différence entre la liaison montante et la liaison descendante.

Les Rapports 564 et 565 fournissent des données pertinentes sur la propagation. Il faut signaler en outre que, depuis 1969, on a procédé en permanence en différents points des Etats-Unis d'Amérique, à des expériences concernant l'affaiblissement dû à la pluie sur des liaisons station terrienne-satellite. Les fréquences de mesure étaient 11,7, 13,6, 15,5, 17,8, 19 et 28,5 GHz. Les résultats provisoires de dix années d'expérimentation (1969-1978) ont été publiés dans différentes revues techniques et différents Actes finals de conférence. Lin et autres [1980] résument, en en faisant la synthèse, de nouveaux résultats et les résultats antérieurement publiés, en même temps qu'ils discutent les systèmes de radiocommunication. Le résumé porte notamment sur la dépendance géographique, la dépendance de fréquence, les statistiques journalières, mensuelles et annuelles de l'affaiblissement dû à la pluie, les facteurs d'amélioration associés à la technique de la diversité, la distribution de la durée des évanouissements, le comportement dynamique de l'affaiblissement dû à la pluie, la distribution à long terme (20 ans) des taux de précipitation en différents endroits des Etats-Unis d'Amérique et sur un modèle empirique simple de l'affaiblissement causé par la pluie.

Si l'on veut satisfaire aux objectifs classiques de fiabilité à grande distance, les données indiquent que la liaison station terrienne-satellite à 28,5 GHz demandera, en admettant une marge d'évanouissement de 20 dB, une protection par diversité d'emplacement dans la plupart des endroits des Etats-Unis d'Amérique. Le fonctionnement dans cette partie du spectre ou dans des bandes de fréquences plus élevées demandera probablement de nouvelles procédures d'exploitation des réseaux.

Par ailleurs, quand l'angle de site de l'antenne est relativement grand, la protection par diversité d'emplacement peut être évitée aux fréquences égales ou inférieures à 14 GHz.

La liaison station terrienne-satellite à 19 GHz peut demander ou non la protection par diversité d'emplacement, selon l'endroit où est située la station terrienne et selon la position orbitale du satellite. Parmi les autres conclusions d'importances majeures, on relève les suivantes:

- les interruptions causées par la pluie ont pour les liaisons station terrienne-satellite, de plus graves conséquences que n'en ont pour les faisceaux hertziens de Terre (6/4 GHz), les interruptions dues aux évanouissements par trajets multiples, même si les deux systèmes sont techniquement conçus pour une égale durée totale d'interruption. Cela tient au fait que les évanouissements par trajets multiples se produisent surtout pendant les premières heures du matin, quand l'activité téléphonique est peu intense. De plus, les évanouissements par trajets multiples sélectifs en fréquence, n'interrompent à un moment donné que la transmission d'une fraction de la largeur de bande. En revanche, environ 35% des évanouissements dus à la pluie se produisent pendant les heures de grand trafic téléphonique et l'interruption portera en même temps sur toute la largeur de bande de la liaison station terrienne-satellite;
- la protection par diversité d'emplacement peut réduire de dix fois le temps d'interruption dû à la pluie, à condition que les emplacements utilisés en diversité soient distants de plus de 20 km. La protection par diversité orbitale, quoique efficace contre les interruptions dues au transit solaire, ne réduit le temps d'interruption que de moins de 20%.

Dans le calcul des bilans de puissance de la liaison, il faut tenir compte du bruit de la liaison montante et de la liaison descendante, des brouillages externes ainsi que des dégradations internes, telles que l'intermodulation, le brouillage dans la même voie et dans les voies adjacentes, tout comme pour les systèmes fonctionnant au-dessous de 10 GHz. Toutefois, l'importance relative de ces contributions peut être différente et varie en général sensiblement avec les conditions de propagation. Les paramètres des systèmes conçus pour assurer des transmissions internationales doivent être définis conformément aux Avis 353 et 522. Ces Avis spécifient la qualité de transmission pour trois pourcentages de temps. Les bilans de puissance des liaisons doivent être calculés pour ces trois pourcentages de temps. Pour chaque station terrienne du réseau, les paramètres correspondants doivent être définis de manière à satisfaire à la condition la plus rigoureuse. Alors qu'aux fréquences inférieures à 10 GHz, la principale condition est généralement la condition à long terme, aux fréquences supérieures à 10 GHz, n'importe lequel des trois pourcentages pourra être le plus rigoureux, selon les spécifications du système et les conditions climatiques locales. Pour cette raison, certains paramètres de station terrienne comportent généralement plus d'une spécification pour tenir compte des phénomènes de propagation. L'Annexe IV du présent Rapport décrit une méthode permettant de calculer un diamètre d'antenne de station terrienne à partir d'une spécification de G/T.

5. Conclusions

Aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, la diffusion et l'absorption causées par les nuages et les précipitations ont une influence bien plus grande. En outre, comme il peut y avoir une différence sensible entre les fréquences des liaisons montante et descendante, il est nécessaire d'étudier le projet avec soin si l'on veut que les objectifs de qualité spécifiés soient atteints de façon uniforme.

Pour surmonter les difficultés causées pendant de petits pourcentages de temps par un affaiblissement important dû à des précipitations, on peut recourir à des méthodes telles que la réception en diversité d'emplacement, l'utilisation d'une bande de fréquences de remplacement ou l'adoption de systèmes adaptatifs.

L'utilisation de bandes de fréquences avoisinant les 30 et 20 GHz, où l'on dispose d'une bande de fréquences de 3,5 GHz, permettrait de réaliser des systèmes régionaux ou nationaux de très grande capacité, avec antennes à faisceau étroit, et d'installer les stations terriennes de ces systèmes très près des centres de trafic.

Plusieurs systèmes de communication par satellite fonctionnent déjà depuis un certain temps dans la gamme de fréquences 14/11 GHz. Ils ont prouvé qu'un fonctionnement fiable peut être assuré sans difficultés à ces fréquences.

En ce qui concerne la gamme de fréquences 30/20 GHz, d'importants résultats ont été obtenus grâce aux expériences de communications effectuées avec le CSE (satellite expérimental de télécommunication à capacité moyenne) du Japon. A la suite de ces expériences, on a mis au point des méthodes de conception pour l'équipement des satellites fonctionnant dans la bande 30/20 GHz et pour l'équipement des stations terriennes. Les perspectives d'utilisation pratique d'un système de communication par satellite à 30/20 GHz semblent être extrêmement bonnes, à condition que l'angle de site minimal soit satisfaisant, compte tenu des conditions climatiques locales [Hatsuda et autres, 1980].

Concernant l'étude et la planification de systèmes fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz environ dans le service fixe par satellite, plusieurs points demandent un complément d'étude. Ce sont, par exemple, la détermination du rapport G/T des stations terriennes et de la marge de puissance à prévoir pour la propagation, y compris l'influence de celle-ci sur la discrimination par polarisations croisées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HATSUDA, T., MORIHIRO, Y. et NAKAJIMA, S. [juillet-août 1980] Link calculation method for 30/20 GHz band satellite communication system. *Rev. Elec. Comm. Lab.*, NTT, Vol. 28, **7/8**, 604-619.

LIN, S. H., BERGMANN, H. J. et PURSLEY, M. V. [février 1980] Rain attenuation on Earth-satellite paths – summary of 10-year experiments and studies, *BSTJ*, Vol. 59, **2**, 183-228.

BIBLIOGRAPHIE

DALGLEISH, D. J. et REED, A. C. [25-27 novembre 1969] Some comparisons of the traffic-carrying capacity of communication-satellites using digital techniques with the capacity of satellites using frequency modulation. Proc. INTELSAT/IEE Conference on Digital Satellite Communications, London, 226-240.

HATSUDA, T., FUKETA, H. et IZUMI, K. [février 1974] System design of millimetre-wave satellite communication systems. Tech. Group on Communication systems, Inst. Electronics and Communications Engineers of Japan, Paper CS 73-147.

IPPOLITO, L. J. [février 1971] Effects of precipitation on 15.3 and 31.65 GHz earth-space transmissions with the ATS-V Satellite. *Proc. IEEE International Conference on Communications* (ICC '71), Montréal, Canada, Conf. Rec., Vol. 59, **2**, 189-205.

IPPOLITO, L. J. [19-21 juin 1972] The 20 and 30 GHz communications system for the ATS-F millimetre wave experiment. IEEE International Conference on Communications (ICC '72), Philadelphia, Pa., USA, Conf. Rec., Session 26: Aerospace and electronic systems, 26-2 – 26-7.

KAPLUNOV, B. B. [1971] Rasprostranenie millimetrovykh voln v atmosfere i sputnikovaya sviaz (Propagation atmosphérique des ondes millimétriques dans les communications par satellite). *Obzornaya informatsiya o zarubezhnoi tekhnike svyazi* (Revue de la technologie des télécommunications à l'étranger). Ministère des télécommunications de l'U.R.S.S., **5**, 24-55.

ANNEXE I

FONCTIONNEMENT EN DIVERSITÉ D'EMPLACEMENT

1. Considérations générales en matière de conception

La qualité de fonctionnement requise pour les stations terriennes en diversité dépend non seulement des zones hydrométéorologiques mais aussi de la configuration des stations terriennes fonctionnant en diversité d'emplacement. Le premier type de configuration est la diversité symétrique, c'est-à-dire la diversité par deux stations terriennes ayant la même qualité de fonctionnement. L'autre configuration est la diversité dissymétrique dans laquelle la qualité de fonctionnement d'une station terrienne (station principale) est suffisamment élevée pour permettre de réduire considérablement la qualité de fonctionnement spécifiée pour l'autre station (sous-station). Ce type de configuration en diversité est prévu lorsque l'antenne principale de la station est dotée d'un système d'alimentation à bandes de fréquences multiples, telles que la bande des 6/4 GHz et des 14/11 GHz et/ou lorsque la sous-station doit être simplifiée pour des raisons techniques ou opérationnelles.

Le Tableau I récapitule, à titre d'exemple, les résultats des calculs du diamètre de l'antenne et de la puissance maximale d'émission requise pour des liaisons en diversité symétrique avec de faibles angles de site. On y trouve les estimations correspondant aux deux liaisons en diversité supposées: (A) Yamaguchi-Hofu (distance de diversité = 20 km) et (B) Yamaguchi-Hamada (100 km), toutes deux au Japon.

Ce tableau montre que les diamètres d'antenne requis pour la liaison MF à 14/11 GHz (14 GHz pour la liaison montante et 11 GHz pour la liaison descendante) sont de l'ordre de 28 m et 19 m pour (A) et (B) respectivement. Lorsqu'on peut augmenter le diamètre de la station principale par rapport à ces valeurs, le diamètre requis pour la sous-station diminue. Les valeurs indiquées dans ce tableau ont été obtenues à l'aide de nombreuses caractéristiques de liaison établies pour les satellites Intelsat-V, de sorte qu'elles sont soumises à des variations lorsque les paramètres de la liaison sont différents de ceux utilisés dans le présent Rapport.

Les méthodes de calcul des qualités de fonctionnement requises (diamètre de l'antenne et p.i.r.e.) pour les stations terriennes en diversité varient en fonction des configurations. Pour une liaison en diversité symétrique, les calculs doivent être fondés sur la distribution de probabilité combinée de l'affaiblissement dû à la pluie aux deux emplacements, alors que dans le cas de la configuration en diversité dissymétrique, il est nécessaire de connaître la distribution cumulative dans le temps de l'affaiblissement dû à la pluie et la probabilité conditionnelle de l'affaiblissement.

La probabilité conditionnelle $P(L''/L')$ est la probabilité pour que l'affaiblissement dû à la pluie à l'emplacement de la sous-station dépasse L'' lorsque l'affaiblissement dû à la pluie observé à l'emplacement principal dépasse L' [CCIR, 1978-82].

Pour établir des estimations fiables des conditions requises pour les stations terriennes, il faut disposer de statistiques fiables fondées sur des mesures de propagation à long terme.

TABLEAU I – *Exemple de calculs des qualités de fonctionnement requises pour des liaisons en diversité symétrique et de faibles angles de site (14/11 GHz)*

Emplacement	(A) Yamaguchi - Hofu		(B) Yamaguchi - Hamada	
Angle de site (degrés)	9,1	9,1	9,1	8,4
Distance de diversité (km)	20		100	
MF				
Diamètre de l'antenne requis (m)	28 / 32		19 / 22	
Puissance d'émission(1) requise (W) (Valeur maximale)	730		510	
AMRT(2)				
Diamètre de l'antenne requis (m)	17 / 19		11 / 12	
Puissance d'émission requise (W) (Valeur maximale)	530		400	

(1) Valeurs pour une porteuse MRF-MF de 792 voies (25 MHz).

(2) Valeurs pour une modulation MDP cohérente quadrivalente à 120 Mbit/s avec correction d'erreur sans circuit de retour.

Hypothèses:

Fréquence: 14,5 (liaison montante)/11,7 GHz (liaison descendante)

Position orbitale du satellite: 63° E, 0° N

p.i.r.e. du satellite: 41,1 dBW

Les diamètres d'antenne sont estimés pour:

T_S = 50 K et T_S = 150 K

T_S: température de bruit du système de l'antenne de la station terrienne

Efficacité de l'antenne de la station terrienne: 65%

Ces estimations sont fondées sur les statistiques du taux de précipitation obtenues pour ces emplacements.

2. Exploitation avec commutation en diversité d'emplacement

Pour la mise en œuvre de stations terriennes exploitées en diversité, il faut que la commutation soit effectuée avec le plus grand soin car il peut se produire à ce moment une perte de signal de courte durée ou au contraire un chevauchement, en raison de la différence de longueur des trajets en diversité ou d'une discontinuité de phase de la porteuse.

Dans des transmissions analogiques, telles que les transmissions MF-AMRF, la commutation en cours d'émission causera inévitablement une discontinuité de phase de la porteuse, ce dont il résultera des à-coups du signal à la sortie du démodulateur dans les stations terriennes de réception. On peut éviter ces à-coups dans la station terrienne de réception en ajustant soigneusement la longueur du trajet électrique de chaque liaison en diversité, mesurée de l'équipement de commutation au satellite.

Dans les transmissions numériques, on peut éviter les à-coups de signaux, même lorsque la commutation s'effectue dans la station terrienne d'émission, en insérant des intervalles fantômes dans la séquence de signaux émis et en effectuant la commutation pendant l'intervalle fantôme. Dans les stations terriennes de réception, il faut éliminer les intervalles fantômes, que la commutation ait eu lieu ou non.

C'est avec les transmissions AMRT que l'on peut obtenir le plus facilement une commutation sans à-coups dans les parties émission et réception des systèmes en diversité [Watanabe et autres, 1978]. Des intervalles fantômes sont incorporés aux transmissions AMRT, qui n'occupent qu'une partie de la trame AMRT. De plus, les démodulateurs AMRT sont conçus de manière à recevoir des porteuses en mode paquet de phase non cohérente. En conséquence, la non-cohérence de phase des porteuses AMRT ne crée aucune difficulté. Le seul problème que peut poser l'exploitation en diversité d'emplacement pour les transmissions AMRT tient à la nécessité d'un contrôle très précis du rythme à l'émission, même pour l'émission initiale à partir de la station en attente. Pour ce faire, on peut soit émettre continûment un paquet fantôme à partir de la station en attente, soit obtenir du satellite des données de distance assez précises, ce qui est possible lorsque le système AMRT comporte une synchronisation à boucle ouverte. Un système expérimental utilisant la technique des paquets fantômes est décrit dans [Fugono et autres, 1979].

3. Liaisons d'interconnexion pour la réception en diversité

Le fait que le circuit fictif de référence du CCIR, défini dans l'Avis 352, et que le conduit numérique fictif de référence défini dans l'Avis 521 comprennent les liaisons d'interconnexion avec le point de commutation pour la réception en diversité (LID) et tous les dispositifs de modulation et de démodulation nécessaires, est un facteur qui doit être pris en considération. Cela signifie que les bilans de bruit du système doivent tenir compte de tous les effets des LID.

3.1 *Configuration fondamentale*

3.1.1 *Aspects physiques*

On peut envisager plusieurs configurations de spécificités différentes ainsi que les raisons pour préférer l'une d'entre elles. Deux de ces configurations sont définies dans la présente Annexe et décrites ci-après (voir la Fig. 1):

- Un emplacement principal où sont installés les appareils de commutation de diversité et de jonction avec la liaison de Terre. L'emplacement de diversité est relié par une LID en faisceau hertzien à deux bonds, avec un répéteur actif ou un répéteur passif. (On suppose qu'il existe un emplacement de répéteur car il est peu probable que les emplacements de diversité soient en visibilité directe l'un de l'autre.)
- Deux emplacements de diversité et un emplacement de commande distinct où sont installées la jonction et la commutation de diversité; l'emplacement de commande est relié à chaque emplacement de diversité par un faisceau hertzien à un seul bond.

On peut aussi réaliser la LID sans utiliser les ondes radioélectriques. Quand une station terrienne utilise la technique MF-MRF et la technique MRT (AMRF ou AMRT), deux liaisons parallèles sont habituellement nécessaires.

3.1.2 *Conditions requises pour la modulation*

Quand on utilise la technique MF-MRF, étant donné que les schémas de la modulation et de la bande de base ne sont pas habituellement les mêmes sur une liaison par satellite que les schémas classiques utilisés dans les systèmes de Terre, il sera nécessaire de procéder à une remodulation. La différence des schémas réside dans la disposition des voies. Dans le système de Terre, les voies seront habituellement combinées dans une ou plusieurs bandes de base dans chaque direction et l'indice de modulation sera relativement bas. A la station terrienne, les bandes de base du système de Terre seront réparties en un certain nombre de bandes de base de transmission à destinations multiples, dont la composition sera différente de celle des bandes de base du système de Terre; de même, l'indice de modulation sera modifié à la station terrienne. Les bandes de base de réception sont encore plus nombreuses et peuvent ne comporter que quelques voies dont la disposition devra être modifiée dans le système de Terre pour constituer des bandes de base de faisceau hertzien. Ce procédé exige des circuits de modulation et de démodulation à l'emplacement de la station terrienne principale et à l'emplacement de diversité où est utilisé le schéma classique de la LID. Toutes les configurations peuvent être utilisées avec remodulation en doublant l'équipement à l'emplacement de diversité.

Une autre méthode consiste à utiliser dans le système de Terre les mêmes schémas de modulation que dans le système à satellite. Il semblerait que cette technique soit réalisable, bien qu'elle ne soit pas classique. Elle permettrait d'économiser le montant que coûterait un équipement de remodulation, même en consentant un éventuel débours supplémentaire pour le système de Terre; mais il se pourrait aussi qu'il puisse en résulter des économies en ce qui concerne ce dernier. La technique qui vient d'être décrite n'est

applicable qu'à la deuxième des configurations représentées dans la Fig. 1. Quand on utilise la technique MRT (AMRF ou AMRT), l'une ou l'autre des deux méthodes peut être employée. Dans le cas de la technique AMRT, la commutation en diversité s'effectue entre les paquets (voir le § 2 de l'Annexe I). La même modulation peut être utilisée sur la LID, comme elle est utilisée sur le système à satellite, mais les débits binaires ne seront pas normalement ceux d'un système radioélectrique numérique de Terre conventionnel.

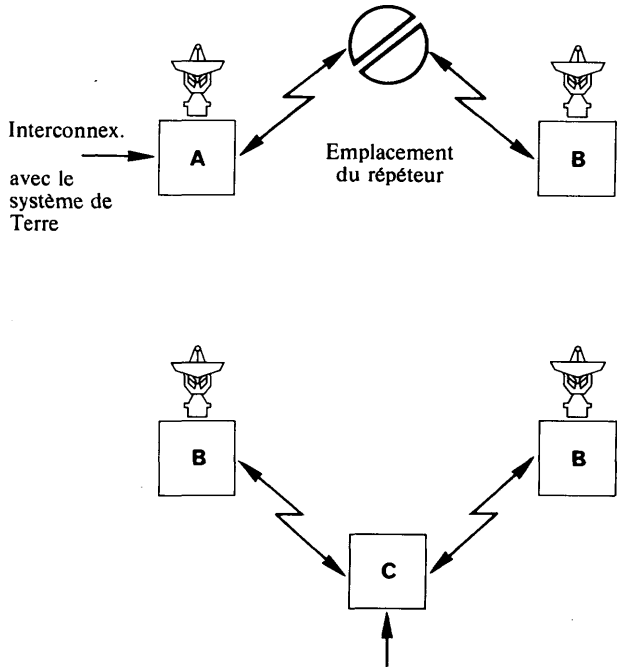


FIGURE 1 – *Configurations de stations terriennes fonctionnant en diversité d'emplacement*

A: Emplacement principal
B: Emplacement de diversité
C: Emplacement de commande

3.2 *Facteurs techniques*

3.2.1 *Choix des bandes de fréquences*

S'agissant de choisir les bandes de fréquences d'une LID en faisceau hertzien, il faut s'assurer par une étude attentive qu'on obtient bien la qualité de fonctionnement globale requise. Des renseignements sur la propagation des hyperfréquences dans un système de Terre se trouvent dans les Rapports 338 et 720 du CCIR.

3.2.2 *Largeur de bande nécessaire*

Le rapport de la largeur de bande nécessaire pour la LID à la largeur de bande de la station terrienne peut être inférieur ou égal à 1 selon que l'on utilise ou non la remodulation. S'il ne s'agit que d'une transposition de fréquences, les largeurs de bande doivent alors être égales, MHz pour MHz. Si, au contraire, on procède à une remodulation, on peut obtenir une plus grande capacité en voies en utilisant des indices de modulation de fréquence plus petits, mais au prix d'une jonction multiplex assez coûteuse.

3.2.3 *Affaiblissements dus aux précipitations*

Un autre facteur est lié aux affaiblissements dus aux précipitations et aux caractéristiques des emplacements de diversité par rapport aux effets des précipitations. Un climat sec est préférable. On prévoit que l'espacement nominal devrait être de 16 km environ. On peut estimer que la meilleure orientation de la ligne joignant deux emplacements doit coïncider avec la perpendiculaire à la direction

des contours des conditions météorologiques dominantes, car on ne saurait s'attendre que les affaiblissements les plus notables affectent simultanément les deux emplacements; on obtiendrait ainsi les meilleures conditions pour la réception en diversité [Gray, 1973; Hall et Allnut, 1975; Davis et Croom, 1974]. Il y a lieu de tenir compte, mais à titre secondaire, des effets des conditions météorologiques sur les LID en faisceau hertzien, si ces liaisons fonctionnent dans les bandes de fréquences supérieures.

3.2.4 *Variations du temps de transmission dues à la commutation de diversité*

Un autre élément déterminant est lié à la différence des temps de propagation des signaux reçus en diversité lorsqu'ils arrivent au point de commutation. Les variations du temps de transmission qui sont dues à la commutation de diversité sont étudiées dans le Rapport 383.

3.3 *Considérations générales*

Deux particularités de la liaison d'interconnexion pour la réception en diversité (LID) jouent un rôle important:

- sa contribution au bilan de bruit global de l'ensemble du système, et
- sa contribution aux interruptions du système.

Les apports de bruit sont étudiés dans ce qui suit en vue de déterminer leurs effets et leurs interactions avec les circuits du système comprenant les liaisons avec le satellite.

On peut concevoir de deux façons différentes une liaison d'interconnexion entre un système de Terre et des stations terriennes assurant la réception en diversité. Si l'on choisit la méthode de «remodulation», on peut utiliser les schémas classiques des systèmes de faisceaux hertziens. Si l'on choisit la méthode de «translation des fréquences», le schéma sera différent et très similaire à celui des systèmes à satellite. Les conditions de fonctionnement globales devront tenir compte des marges contre les évanouissements et des apports de bruit. Dans le cas particulier où les mêmes fréquences sont utilisées pour la LID et le système à satellite, il faudra aussi tenir compte du bruit de brouillage.

3.3.1 *Bilans de bruit pour la technique MF-MRF*

Pour que la qualité de fonctionnement du système soit conforme aux normes recommandées dans l'Avis 353, il convient que les apports de la LID au bruit global dans le circuit fictif de référence soient raisonnablement faibles.

On peut raisonnablement admettre que l'apport de bruit fourni par la LID soit considéré comme faisant partie du bilan de la station terrienne (environ 1500 pW0p) puisque la LID contribue, en fait, au fonctionnement normal de la station terrienne. Il suffit seulement de s'assurer que cet apport soit maintenu à un niveau assez bas pour que le total de 1500 pW0p ne soit pas dépassé. Les évanouissements dans la LID contribueront au bilan du bruit global dans la liaison pendant une courte période de temps.

Le nombre des composantes du bruit apporté par la LID dépend de la configuration de l'installation et des bandes de fréquences utilisées. Ces composantes sont les suivantes:

a) *Bruit thermique*

Dans les systèmes de faisceaux hertziens établis selon les normes classiques du CCIR, la puissance de bruit est de 1 à 3 pW0p par km, ou même moins, et peut être maintenue à 10 pW0p au plus sur un seul bond. Ces valeurs peuvent également être faibles dans le cas de systèmes spéciaux. Les composantes variables dans le temps, dues aux évanouissements causés par les trajets multiples et à l'affaiblissement dû aux précipitations, sont relativement grandes; elles peuvent cependant être ramenées à des valeurs raisonnables dans le cas de bonds de peu de longueur. Le bruit thermique est en raison directe, dB pour dB, de la profondeur des évanouissements quel que soit leur mécanisme.

b) *Bruit de fond intrinsèque*

Il s'agit là du bruit dans la bande de base; il n'intervient que dans le cas de systèmes où la méthode de remodulation est utilisée. Des puissances de bruit de 50 à 100 pW0p sont courantes lorsque les bandes de base sont «dos à dos». Le bilan de bruit d'une station terrienne normale tient compte d'un apport de ce genre, mais un système comportant une remodulation en ajouterait un deuxième.

c) *Brouillage*

Dans quelques cas, des systèmes de faisceaux hertziens fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences pourraient introduire une très petite quantité de bruit de brouillage. Cet apport peut être considéré comme négligeable. Dans le cas particulier de la réutilisation de la même bande de fréquences, on peut s'attendre que les liaisons Terre vers espace et espace vers Terre produiront quelque brouillage dans la station terrienne. On estime que, dans des conditions de fonctionnement normales, le niveau du bruit de brouillage serait de 10 à 100 pW0p. De plus, dans certaines situations, les évanouissements peuvent être accompagnés d'augmentations du bruit de brouillage pendant de très courtes périodes ainsi que de bruit thermique. Cette configuration n'exige pas de remodulation, de sorte que le bruit supplémentaire que cette méthode apporterait (bruit de fond intrinsèque) n'intervient pas.

d) *Intermodulation*

Un système comportant la remodulation devra être pourvu d'un circuit modulateur-démodulateur supplémentaire et d'amplificateurs à fréquence intermédiaire, tandis qu'un système comportant une transposition de fréquence serait entièrement constitué par un équipement classique de station terrienne et, de ce fait, ne produirait que très peu de bruit d'intermodulation.

Le tableau ci-dessous est un exemple de bilan de bruit possible.

TABLEAU II

Echantillons de bilans de bruit – Conditions d'espace libre				
	Remodulation (2 bonds)		Translation de fréquence (1 bond)	
	Faible (pW0p)	*Elevé* (pW0p)	*Faible* (pW0p)	*Elevé* (pW0p)
Bruit thermique	2	20	1	10
Bruit d'intermodulation dans la bande de base	50	100	–	–
Bruit de brouillage	–	–	10	100
Bruit d'intermodulation (en fréquence radioélectrique)	100	200	20	50
Total (pW0p)	152	320	31	160

3.3.2 *Bilan d'erreur pour la technique AMRT*

La contribution de la LID au taux global d'erreur du conduit numérique fictif de référence doit être assez faible pour que la qualité de fonctionnement du système demeure conforme aux clauses de l'Avis 522.

Il est à noter que dans le cas de la LID de remodulation, les erreurs seront additives tandis que, dans le cas de la transposition de fréquence, ce sont les effets du bruit qui le seront.

3.3.3 *Fréquences*

Les caractéristiques des évanouissements en fonction de la fréquence du climat et de la longueur du trajet, en présence de précipitations, peuvent être déterminées d'après celles des systèmes classiques de faisceaux hertziens. L'affaiblissement dû aux précipitations et les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples sont des phénomènes indépendants – en fait ils sont presque mutuellement exclusifs.

Etant donné que l'espacement prévu entre deux stations terriennes assurant la réception en diversité est de 16 à 24 km et qu'un répéteur, ou un emplacement commun, sera nécessaire, la longueur des LID ne dépassera vraisemblablement pas 16 km. Normalement, on peut prévoir des marges suffisamment grandes pour un trajet de cette longueur, de façon que la proportion du temps pendant laquelle se produisent des interruptions brèves s'abaisse à 0,001%.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DAVIS, P. G. et CROOM, D. L. [novembre 1974] Diversity measurements of attenuation at 37 GHz with solar tracking radiometers. *Electron. and Lett.*, Vol. 10, 482-3.

FUGONO, N., YOSHIMURA, K. et HAYASHI, I. [octobre 1979] Japan's millimeter wave satellite communication program. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, **10**, 1381-1391.

GRAY, D. A. [22-24 août 1973] Earth to space path diversity; dependence of base-line orientation. IEEE GAP International Symposium.

HALL, J. E. et ALLNUT, J. E. [7-10 avril 1975] Results of site diversity tests applicable to 12 GHz satellite communications. IEE Conference Publication 126.

WATANABE, T., SAITOH, H., OGAWA, A. et DEAL, J. H. [octobre 1978] Space diversity system for TDMA satellite link. 4th International Conference on Digital Satellite Communication, Session IX, Montréal, Canada.

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/26 (Japon).

ANNEXE II

SYSTÈME DE TRANSMISSION DE L'INFORMATION A DÉBIT VARIABLE AVEC CODE DE CORRECTION DES ERREURS

1. Introduction

On peut améliorer la qualité du fonctionnement d'un système de transmission numérique par satellite en réduisant la vitesse de transmission de l'information quand les conditions de propagation sont mauvaises. Pour maintenir le fonctionnement du système au niveau de qualité requis, on emploie alors des codes de correction des erreurs.

2. Technique de codage avec correction des erreurs

En se plaçant dans les hypothèses d'un matériel de construction simple et d'une transmission à grande vitesse, on propose un système comportant un codage par convolution auto-orthogonal avec débit moitié. Quand les conditions de propagation sont mauvaises, on réduit de moitié le débit binaire d'écoulement de l'information et l'on insère après chaque bit d'information un bit de contrôle de parité. La valeur requise du rapport porteuse/bruit (C/N) pour maintenir le taux d'erreur sur les bits à une même valeur globale que dans de bonnes conditions de propagation se trouve donc réduite.

Pour des raisons de simplicité de la construction du matériel, il peut être préférable d'adopter des codes à débit moitié avec correction d'une ou deux erreurs dans chaque bloc de contrainte du train de bits. La réalisation du code de correction d'une seule erreur est quelque peu plus simple que celle du code de correction de deux erreurs.

3. Comparaison avec les autres techniques de variation du débit de l'information

On peut considérer deux autres techniques de transmission de l'information avec débit variable.

La technique des paramètres de modulation variables s'applique aux systèmes MDP dans lesquels le nombre des phases transmises est réduit quand les conditions de propagation sont mauvaises. L'inconvénient de cette technique est qu'elle nécessite de modifier les circuits où transite la porteuse, ce qui peut entraîner une certaine complexité du matériel et une dégradation effective du rapport C/N due à un dérèglement résiduel du matériel.

La technique de la fréquence d'horloge variable consiste à abaisser celle-ci le cas échéant, ce qui permet d'utiliser une largeur de bande étroite dans l'équipement de réception et d'améliorer ainsi la valeur requise du rapport C/N. Cette technique a pour inconvénient de nécessiter une modification des circuits de filtrage et un réglage de la cadence des éléments binaires.

Le Tableau III indique l'amélioration théorique du rapport C/N avec chacune des techniques considérées, dans l'hypothèse d'un système de manipulation par déplacement de phase quadrivalente cohérente (MDPC) avec réduction de moitié du débit binaire.

TABLEAU III – *Amélioration théorique du rapport porteuse/bruit (C/N) équivalent pour un système MDPC de transmission de l'information à débit variable avec réduction de moitié du débit*

Taux d'erreur sur les bits	Amélioration théorique du rapport C/N (dB)			
	Technique de correction d'erreur		Technique des paramètres de modulation variables (4 phases/2 phases)	Technique de la fréquence d'horloge variable
	Possibilité de correction d'une seule erreur	Possibilité de correction de deux erreurs		
10^{-6}	3,0	4,3	3,0	3,0
10^{-4}	2,9	3,9	3,0	3,0

4. Conclusions

Dans ce qui précède, on a proposé une technique d'adaptation pour maintenir la qualité de fonctionnement d'un système quand les conditions de propagation sont mauvaises, en réduisant la vitesse de transmission de l'information et en appliquant un code de correction des erreurs.

Les principaux avantages de cette technique sont les suivants:

- simplicité de mise en œuvre du matériel;
- possibilité d'application avec traitement du signal dans la bande de base;
- inutilité d'un reréglage de la cadence des éléments binaires;
- amélioration possible du rapport C/N, supérieure à celle que permettent les autres techniques considérées.

BIBLIOGRAPHIE

ROBINS, W. P. [19-21 juin 1972] Techniques for dealing with the effects of bad weather in satellite communication systems. IEEE International Conference on Communications (ICC '72), Philadelphia, Pa., USA, Conf. Rec., Session 2: Space communication, 2-25 à 2-30.

ROBINSON, J. P. et BERNSTEIN, A. J. [janvier 1967] A class of binary recurrent codes with limited error propagation. IEEE International Conference on Communications, Vol. IT-13, 1, 106-113.

ANNEXE III

RÉGULATION DE PUISSANCE SUR LA LIAISON MONTANTE

On peut utiliser sur la liaison montante la régulation de puissance pour réduire l'effet de l'affaiblissement de trajet. Cette technique peut être utile pour exploiter efficacement un système de communication par satellite, ainsi que pour réduire les brouillages causés aux autres liaisons, par satellite ou de Terre, si l'on fait diminuer par temps clair la p.i.r.e. Cela s'effectuera normalement en mesurant l'affaiblissement sur la liaison descendante à un moment donné quelconque puis, à l'aide d'un rapport de corrélation entre les affaiblissements sur la liaison montante et la liaison descendante, en déduisant le réglage nécessaire du niveau de puissance sur la liaison montante. Puisque le système fonctionne en boucle ouverte, il est indispensable que l'on puisse se fier à la mesure du niveau de l'affaiblissement sur la liaison descendante, au rapport de corrélation entre ces deux fréquences et à la précision de la commande de puissance sur la liaison montante. Il faudra aussi veiller à ce qu'un brouillage contrapolaire et des rayonnements hors bande excessifs ne résultent pas de l'application de cette technique.

Bien qu'on ait pris pour hypothèse que les erreurs potentielles s'additionnent, il s'agit néanmoins d'une estimation modérée. N'ont pas été prises en considération nombre de sources d'erreurs potentielles trop petites pour qu'on puisse les estimer (par exemple: erreurs de poursuite d'antenne, erreurs de pointage de satellite, erreurs de système dues aux bruits et prenant la forme d'évanouissements profonds, erreurs de préaccentuation, erreurs dues aux dégradations de gain d'antenne, effets de réfraction sous de faibles angles de site, fluctuations rapides du taux de précipitation) ou résultant d'événements rares (par exemple: accumulation de neige mouillée sur le réflecteur, panne des circuits de réglage ou de mesure sur la liaison montante ou la liaison descendante). Toutes ces sources d'erreur additionnelles pourraient, le cas échéant, accroître l'erreur cumulative du niveau de puissance sur la liaison montante.

Une expérience de régulation de puissance sur la liaison montante, effectuée par une administration qui a utilisé une série de fréquences liaison montante/liaison descendante (14/11 GHz), a montré que la variation de la puissance reçue dans un répéteur de satellite pouvait être limitée à 1,5 dB (crête-à-crête) et 0,5 dB (valeur efficace) grâce à une méthode simple qui consiste à évaluer l'affaiblissement dû à la pluie d'un signal de la liaison montante d'après la puissance reçue dans un signal de balise ou un signal de la liaison descendante. Cette expérience a également montré que la variation de la puissance reçue, due à la fluctuation de pointage du faisceau d'une antenne de bord, pouvait être compensée, tout comme l'affaiblissement dû à la pluie, et ce pour la raison suivante: pendant l'expérience, le rapport des variations du gain sur la liaison montante et la liaison descendante, résultant des fluctuations de pointage du faisceau, était approximativement égal au rapport des affaiblissements dus à la pluie sur ces mêmes liaisons [Shimoseko et autres, 1981]. La Fig. 2 présente un exemple des résultats expérimentaux obtenus et indique les paramètres du système. Ces résultats ont été obtenus pour un angle de site de 37°.

TABLEAU IV – *Exemple d'erreurs potentielles sur l'estimation de l'affaiblissement sur la liaison montante (14 GHz) à partir d'une mesure de l'affaiblissement sur la liaison descendante (11 GHz)*

a) *Affaiblissement de moins de 1,0 dB sur la liaison montante*			
Angle de site:	5°	15°	25°
Erreur d'équipement(1)	0,725	0,725	0,725
Affaiblissement par les nuages de glace	0,05	0,05	0,05
Vapeur d'eau/effet de diffusion	0,20	0,10	0,05
Niveau par ciel clair	0,10	0,10	0,10
Erreur maximale sur la liaison montante (dB)	±1,075	±0,975	±0,925
b) *Affaiblissement entre 1 et 6 dB sur la liaison montante*			
Angle de site:	5°	15°	25°
Erreur d'équipement(1)	0,725	0,725	0,725
Affaiblissement par les nuages de glace	0,05	0,05	0,05
Distribution de la dimension des gouttes de pluie	0,10	0,075	0,05
Vapeur d'eau/effets de diffusion	0,20	0,10	0,05
Niveau par ciel clair	0,10	0,10	0,10
Erreur de polarisation	0,10	0,075	0,05
Erreur de longueur de trajet	0,20	0,10	0,05
Couche de fusion	0,05	0,05	0,05
Erreur maximale sur la liaison montante (dB)	±1,525	±1,275	±1,125
c) *Affaiblissement de plus de 6 dB sur la liaison montante*			
Angle de site:	5°	15°	25°
Erreur d'équipement(1)	0,725	0,725	0,725
Affaiblissement par les nuages de glace	0,05	0,05	0,05
Distribution de la dimension des gouttes de pluie	0,20	0,15	0,10
Vapeur d'eau/effets de diffusion	0,10	0,075	0,05
Niveau par ciel clair	0,10	0,10	0,10
Erreur par polarisation	0,20	0,15	0,10
Erreur de longueur de trajet	0,40	0,25	0,15
Couche de fusion	0,05	0,05	0,05
Erreur maximale sur la liaison montante (dB)	±1,825	±1,550	±1,325

(1) L'erreur d'équipement de ±0,725 dB prise en hypothèse ci-dessus est estimée sur la base d'une erreur de ±0,5 dB constatée à 11,7 GHz (sur la liaison descendante) et d'un facteur de proportionnalité présumé de 1,45 entre 11,7 GHz et 14 GHz. L'erreur de ±0,5 dB a été relevée à partir des données disponibles. Il est nécessaire d'en poursuivre la vérification en faisant des mesures supplémentaires.

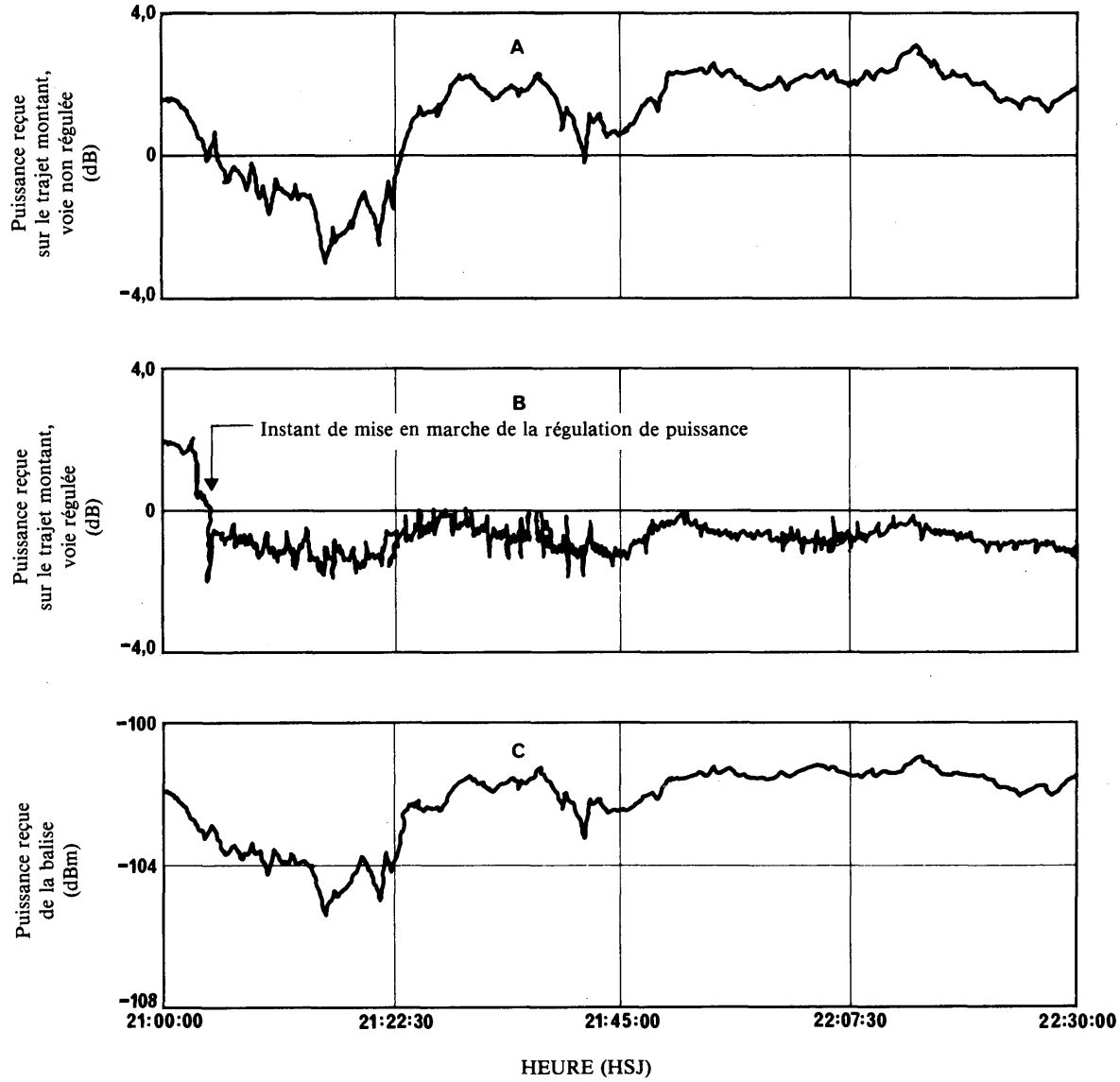


FIGURE 2 – *Résultats d'une expérience de commande de puissance sur la liaison montante*

Système de commande:

On emploie des fonctions quadratiques du temps pour calculer, au moyen de la méthode des moindres carrés, l'affaiblissement dû à la pluie sur le trajet descendant
Période d'échantillonnage: 1 seconde
Intervalle de temps utilisé dans la méthode des moindres carrés: 10 secondes

A: Puissance reçue sur le trajet montant, voie sans régulation de puissance (données de télémesure du BSE)
L'affaiblissement dû à la pluie est d'environ 6 dB (crête-à-crête) et 1,46 dB (valeur efficace)
Fréquence: 14,3625 GHz

B: Puissance reçue sur le trajet montant, voie à régulation de puissance (données de télémesure du BSE)
La variation de la puissance reçue est d'environ 1,5 dB (crête-à-crête) et 0,36 dB (valeur efficace)
Fréquence: 14,2875 GHz

C: Puissance reçue dans le signal de la balise du BSE (Satellite expérimental de radiodiffusion de capacité moyenne) à la station terrienne de Kashima
L'affaiblissement dû à la pluie est d'environ 4 dB (crête-à-crête) et 1,1 dB (valeur efficace)
Fréquence: 11,7125 GHz

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SHIMOSEKO, S., YAMAMOTO, M., KAJIKAWA, M. et ARAI, K. [septembre 1981] Satellite broadcasting experiments and in-orbit performances of BSE. 32e Congrès de la Fédération internationale astronautique (FIA), Rome, Italie. Document N° 81-75.

ANNEXE IV

MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES D'ANTENNE DE STATION TERRIENNE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz

1. Introduction

Dans les systèmes de télécommunications par satellite fonctionnant aux fréquences supérieures à 10 GHz, les spécifications imposées aux stations terriennes et, en particulier, le facteur de qualité G/T de ces stations, font nécessairement intervenir l'affaiblissement dû à l'atmosphère et aux précipitations. Cet affaiblissement est généralement spécifié pour un pourcentage de temps qui est déterminé en fonction de la disponibilité désirée pour le système.

La spécification du facteur de qualité G/T doit tenir compte de l'affaiblissement:

- d'une part, directement, puisque cet affaiblissement conduit à augmenter le G/T requis;
- d'autre part, indirectement, puisque cet affaiblissement entraîne un accroissement de la température de bruit, T.

Les formules données ci-dessous doivent permettre de normaliser les méthodes de détermination des caractéristiques de l'antenne, compte tenu de l'affaiblissement. On trouvera dans les Rapports 390 et 868 des renseignements sur les caractéristiques générales des antennes de station terrienne.

2. Spécification du facteur de qualité

La formule générale spécifiant le facteur de qualité G/T des stations terriennes aux fréquences supérieures à 10 GHz est établie comme suit:

$$\frac{G}{T_i} - L_i \geqslant \left(K_i + 20 \log \frac{F}{F_0}\right) \qquad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \qquad (1)$$

dans la bande de réception des fréquences F pendant au moins $(100 - P_i)$% du temps.

L_i exprimé en dB, est l'affaiblissement supplémentaire sur la liaison descendante associé aux conditions climatiques propres à l'emplacement de la station terrienne considérée par rapport aux conditions nominales de ciel clair.

A titre d'exemples, on peut citer:

a) La double spécification suivante pour les stations terriennes du réseau européen ECS:

$$\frac{G}{T_1} - L_1 \geqslant \left(39 + 20 \log \frac{F}{11{,}2}\right) \quad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \quad \text{pendant au moins 90\% du mois le plus défavorable.}$$

$$\frac{G}{T_2} - L_2 \geqslant \left(31 + 20 \log \frac{F}{11{,}2}\right) \quad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \quad \text{pendant au moins 99,99\% de l'année.}$$

b) La double spécification suivante pour les stations terriennes de norme C INTELSAT:

$$\frac{G}{T_1} - L_1 \geqslant \left(39 + 20 \log \frac{F}{11{,}2}\right) \quad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \quad \text{à observer par toutes les stations terriennes pendant au moins 90\% de l'année.}$$

$$\frac{G}{T_2} - L_2 \geqslant \left(32{,}5 + 20 \log \frac{F}{11{,}2}\right) \quad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \quad \text{à observer pendant au moins 99,983\% de l'année par les stations terriennes situées en Europe.}$$

$$\frac{G}{T_2} - L_2 \geqslant \left(29{,}5 + 20 \log \frac{F}{11{,}2}\right) \quad \text{dB}(\text{K}^{-1}) \quad \text{à observer pendant au moins 99,983\% de l'année par les stations terriennes situées en Amérique du Nord.}$$

Note. – Les valeurs différentes du petit pourcentage de temps, pour chaque région, tiennent au fait que les conditions de propagation ne sont pas les mêmes dans les deux zones, mais elles permettent en même temps l'emploi d'antennes de conception raisonnablement similaire. Pour les autres régions, les valeurs sont encore à l'étude.

3. Modèle de calcul

On se propose d'établir une relation $D =. f(L_i, K_i, T_R)$ permettant de déterminer le diamètre d'ouverture circulaire D à donner à l'antenne d'une station terrienne dont le facteur de qualité $\frac{G}{T_i}$ est spécifié selon la formule (1), et en tenant compte de la valeur T_R de la température de bruit des équipements de réception.

En tenant compte de la relation donnant le gain G de l'antenne:

$$G = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D F}{c} \right)^2 \right]$$

la formule (1) peut s'écrire :

$$20 \log D \geqslant (L_i + K_i) \text{ dB} + 10 \log T_i - 10 \log \eta + 20 \log \frac{c}{\pi F_0} \tag{2}$$

où:

D : diamètre d'antenne (m)

c : vitesse de la lumière: 3×10^8 m/s

F_0 : fréquence (Hz)

η : rendement d'antenne à l'accès réception, à la fréquence F_0

L_i : facteur d'affaiblissement atmosphérique (par rapport aux conditions de ciel clair) exprimé en dB

K_i : valeur spécifiée du facteur de qualité par ciel clair à la fréquence F_0, exprimée en dB/(K^{-1})

T_i : température de bruit de la station, ramenée à l'accès réception, exprimée en kelvins.

La température de bruit de la station terrienne T_i, est représentée avec une bonne approximation par la formule:

$$T_i = \frac{L'_i - 1}{\alpha L'_i} (T_{atm} - T_c) + \frac{1}{\alpha} \left[T_c + T_s + (\alpha - 1) T_{phys} \right] + T_R \qquad \text{K} \tag{3}$$

où:

T_c : température de bruit d'antenne due au ciel clair

T_s : température de bruit d'antenne due au sol

T_{atm} : température physique de l'atmosphère et des précipitations

T_{phys} : température physique des éléments non rayonnants de la source d'alimentation de l'antenne

T_R : température de bruit des équipements de réception

$\alpha \geqslant 1$: pertes ohmiques dues aux éléments non rayonnants de la source d'alimentation de l'antenne

$L'_i \geqslant 1$: affaiblissement dû à l'atmosphère et aux précipitations.

$L'_i = 10^{\frac{L_i}{10}}$, L_i étant exprimé en dB.

Il est commode d'exprimer la formule (3) de la façon suivante:

$$T_i = T_A + (\Delta T_A) + T_R \tag{4}$$

avec:

T_A : température de bruit d'antenne dans les conditions de ciel clair ($L_i = 0$ dB)

$$T_A = \frac{T_c + T_s}{\alpha} + \frac{\alpha - 1}{\alpha} T_{phys} \tag{5}$$

(ΔT_A) : supplément de température de bruit d'antenne dû à l'affaiblissement par l'atmosphère et les précipitations.

$$(\Delta T_A) = \frac{L'_i - 1}{\alpha L'_i} (T_{atm} - T_c) \tag{6}$$

La relation (3) ou la relation (4), portée dans la relation (2), permet de résoudre

$$D = \text{f } (L_i, K_i, T_R)$$

moyennant la connaissance de données complémentaires relatives à des caractéristiques typiques d'antennes de stations terriennes travaillant dans la bande de fréquences considérée [ESA, 1976; Lennart, 1981].

4. Exemple de calcul

On souhaite calculer le diamètre D à donner à une antenne pour station de norme C INTELSAT répondant à la double spécification du § 2b).

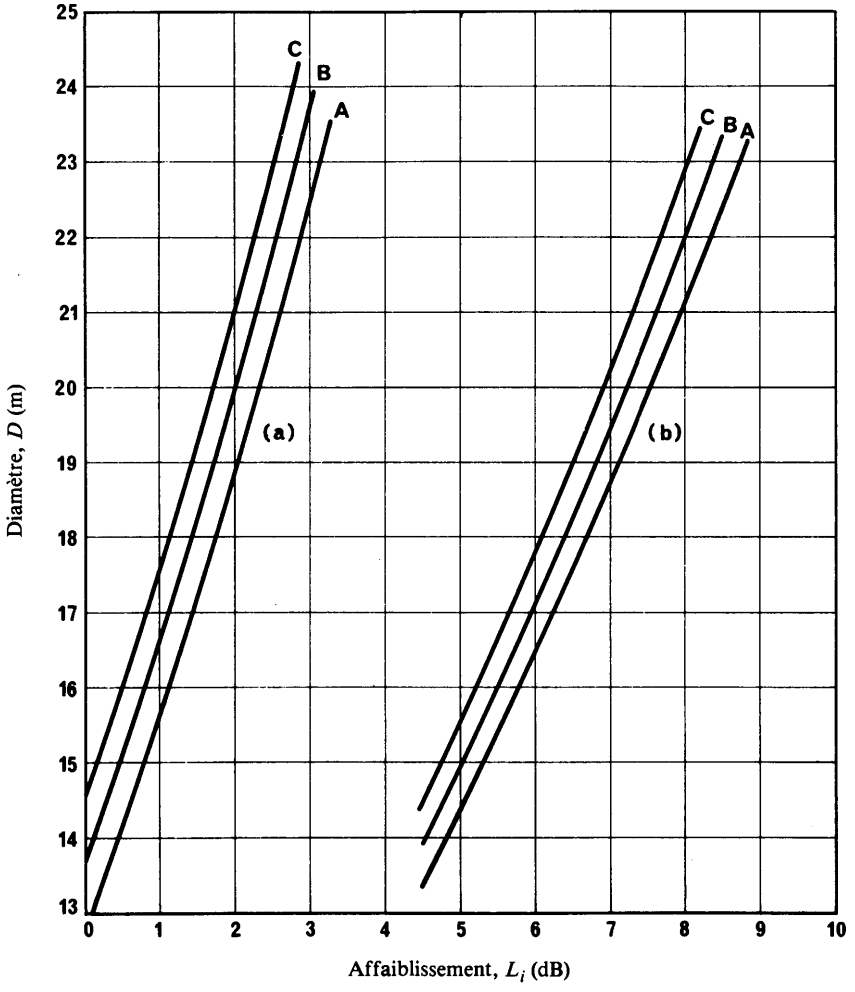


FIGURE 3 – *Variation du diamètre d'antenne D en fonction de l'affaiblissement L_i*

Pour 2 valeurs du facteur de qualité à 11,2 GHz:
(a): G/T_1 = 39 dB(K^{-1})
(b): G/T_2 = 32,5 dB(K^{-1})

et pour 3 valeurs de la température de bruit T_R des équipements de réception:
A : T_R = 130 K
B : T_R = 160 K
C : T_R = 190 K

4.1 *Hypothèses*

- calculs effectués à F_0 = 11,2 GHz, pour un angle de site de l'ordre de 30 degrés au-dessus de l'horizon
- caractéristiques de l'antenne à l'accès réception, à la fréquence F_0 :

η = 0,67

T_c = 15 K, T_s = 10 K } valeurs typiques de contribution à la température de bruit d'antenne pour un angle de site de 30°, à F_0 = 11,2 GHz

T_{atm} = 270 K

T_{phys} = 290 K

α = 1,122 (Pertes ohmiques = 0,5 dB)

- Les spécifications sont:

K_1 = 39 dB

K_2 = 32,5 dB

4.2 *Résultats du calcul*

La Fig. 3 fait apparaître deux séries de courbes

$D = f(L_i)$

paramétrées selon la double spécification du facteur de qualité par ciel clair (K_i) et selon trois valeurs de la température de bruit des équipements de réception T_R (130 K – 160 K – 190 K).

Dans le cas de l'exemple traité, si T_R = 160 K et si l'on souhaite implanter une station dans un emplacement où les données de propagation conduisent à:

$L_1 \leqslant$ 1 dB pendant 90% de l'année

$L_2 \leqslant$ 6 dB pendant 99,983% de l'année

on est conduit aux 2 valeurs suivantes de diamètre d'antenne:

D_1 = 16,80 m

D_2 = 17,20 m

ce qui impose le choix de $D \geqslant$ 17,20 m.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ESA [janvier 1976] Atmospheric attenuation and noise in satellite systems at 11-14 GHz. Doc. EC/9039/SED/SA, Rev. 2.

LENNART, H. [8-10 avril 1981] Correlating OTS beacon measurements with radiometer and rainfall data. IEE International Conference on Results of Tests Experiments with the European OTS Satellite, Londres, Royaume-Uni.

RAPPORT 866

RÉPARTITION DES BROUILLAGES DANS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES MF FONCTIONNANT A DES FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1982)

1. Introduction

Aux fréquences inférieures à 10 GHz, les effets des variations de propagation (évanouissements) sont des facteurs relativement peu importants dans la répartition des bruits internes de la liaison et des brouillages externes. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, les évanouissements deviennent un facteur de plus en plus important pour déterminer ces répartitions, et la conception de la liaison dépend en général des affaiblissements de propagation prévus pour de faibles pourcentages de temps. Il peut être nécessaire de répartir, tant les brouillages à court terme que ceux à plus long terme dans les bandes de fréquences supérieures à 15 GHz.

2. Phénomènes de propagation

Aux fréquences supérieures à 10 GHz, l'affaiblissement dû à la pluie est la cause principale d'évanouissement sur les liaisons par satellite. La Fig. 1 donne un exemple de distribution des affaiblissements dus à la pluie, qui montre qu'à 30 GHz avec un angle de site de l'antenne de 17°, l'affaiblissement est de 17,5 dB pendant 0,3% du mois le plus défavorable à Halifax, ville type du Canada située dans une région à faibles précipitations. Des affaiblissements beaucoup plus importants se rencontrent dans les régions à très fortes précipitations où les cellules orageuses sont les plus nombreuses. L'affaiblissement causé par la pluie augmente rapidement avec la fréquence dans la région de 4 GHz à 30 GHz comme l'indiquent les courbes de la Fig. 1. Les valeurs changent aussi beaucoup d'un lieu à un autre, comme il ressort d'une comparaison entre des données recueillies à Halifax et

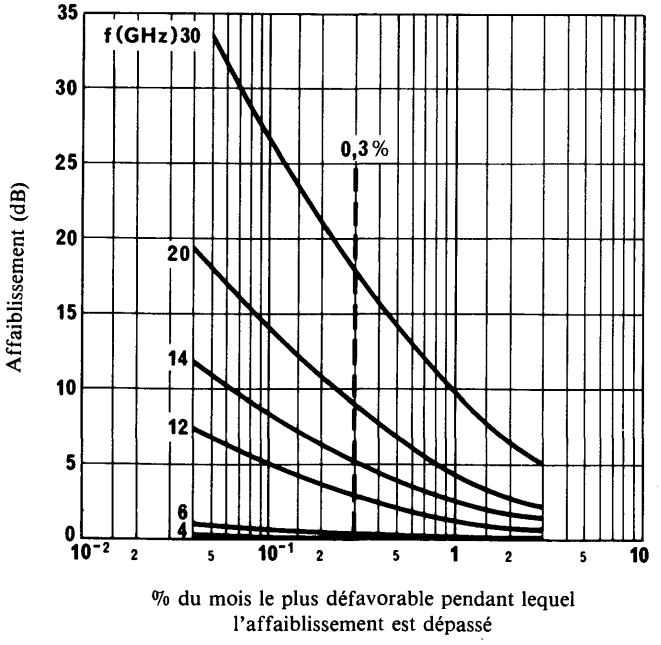


FIGURE 1 – *Distribution de l'affaiblissement dû à la pluie le long d'une liaison satellite-Terre, avec un angle de site de 17°, à Halifax*

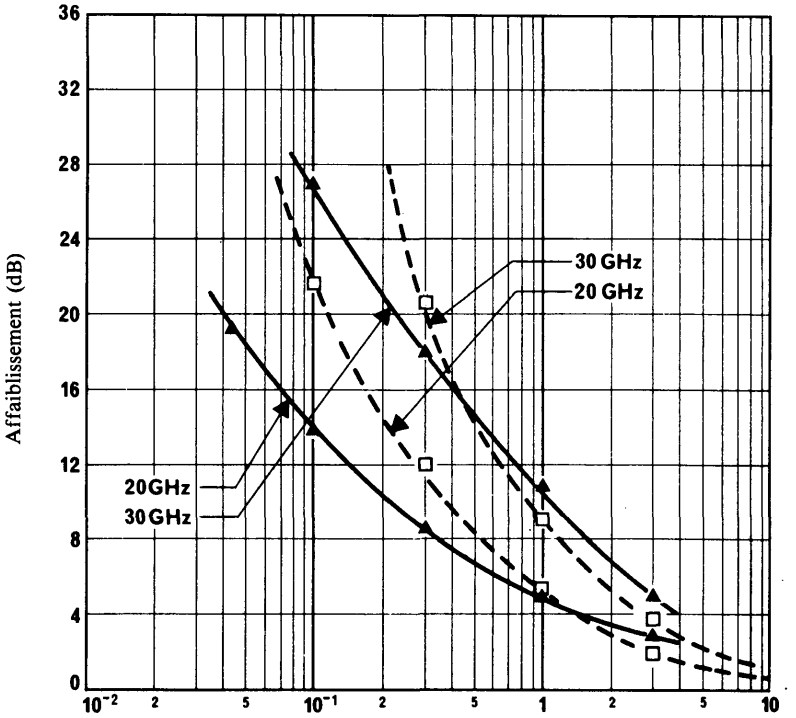


FIGURE 2 – *Exemples des différences constatées dans l'affaiblissement dû à la pluie d'un lieu à un autre à 20 et 30 GHz*

▲——▲ données de Halifax (angle de site 17°)

□– – –□ données de Tokyo (angle de site 48,5°)

3. Conception de la liaison et brouillage mutuel

La diversité d'espace et le contrôle de la puissance sur la liaison montante peuvent être appliqués ou non sur les liaisons par satellite; ces facteurs doivent être examinés conjointement avec la corrélation des évanouissements des signaux utiles et brouilleurs sur les liaisons montantes et sur les liaisons descendantes.

Pour la liaison descendante, on s'attend à une corrélation très marquée entre l'évanouissement du signal utile et l'évanouissement du signal brouilleur provenant de satellites voisins qui causent des brouillages significatifs, de sorte que le rapport $(C/I)_d$ ne diminue pas de manière significative si l'affaiblissement augmente, avec ou sans diversité. Pour la liaison montante, on ne prévoit pas d'évanouissements concomitants sur le trajet du signal et sur le trajet du brouillage, de sorte que le rapport $(C/I)_u$ pourra être presque proportionnel à C_u sur une liaison montante sans contrôle de la puissance. Sur cette liaison, avec contrôle complet de la puissance, le rapport $(C/I)u$ peut être maintenu pratiquement constant en présence d'évanouissements. Le brouillage I_u causé par une liaison montante à puissance contrôlée devrait aussi être à peu près constant pendant les évanouissements sur la liaison montante; il est en général inférieur à celui qui est causé par une liaison montante à puissance fixe, puisque la puissance de celle-ci doit être plus grande en permanence, sauf si l'on y recourt à une réception en diversité. On prévoit que la corrélation entre les évanouissements sur la liaison montante et sur la liaison descendante est minime de sorte que des évanouissements concomitants ne se produisent que pendant un pourcentage du temps.

Dans ces hypothèses, à la sortie d'un récepteur MF, les relations approximatives entre le bruit du brouillage i, le bruit thermique n et C sont suivant les cas:

a) pour une liaison descendante, i est sensiblement constant, n proportionnel à $1/C$, et i/n proportionnel à C;

b) pour une liaison montante sans contrôle de la puissance, i/n est sensiblement constant, i proportionnel à $1/C$ et n proportionnel à $1/C$;

c) pour une liaison descendante, sur la liaison montante avec contrôle de puissance, n et i sont presque constants.

Etant donné que i est presque constant dans les cas a) et c), il n'y a peut-être pas lieu de répartir les brouillages à court terme. En revanche, dans le cas b), une liaison conçue avec une grande marge d'évanouissement pour satisfaire les caractéristiques prévues à court terme aura un n très faible en l'absence d'évanouissement, si bien qu'avec les répartitions de brouillage actuellement en vigueur, il est possible que $i \gg n$. Sur une liaison montante avec évanouissement, i_u et n_u augmenteront tous les deux de manière proportionnelle, et lorsque $i_u \gg n_u$ c'est i_u et le bruit d'intermodulation qui influent le plus sur les caractéristiques à court terme, car ce sont eux qui constitueront généralement la plus grande partie du bruit du système. Ainsi, dans les bandes de fréquences supérieures, il faudra peut-être définir une marge de brouillage à court terme si l'on utilise une liaison montante sans diversité et sans contrôle de la puissance. Toutefois, il faut aussi noter qu'une répartition raisonnable des brouillages à court terme peut conduire à une protection nécessaire très faible contre le brouillage à long terme sur la liaison montante et, par conséquent, porter préjudice à l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences. Ainsi, la répartition des brouillages à court terme doit toujours être aussi rigoureuse que possible, de manière à réduire au minimum tout effet préjudiciable sur l'utilisation de l'orbite et du spectre.

L'effet de la diversité d'espace sur le contrôle de la puissance sur la liaison montante a pour résultat de réduire les marges nécessaires pour atteindre les caractéristiques prévues, c'est-à-dire qu'il équivaut à une réduction de la gamme d'évanouissement. On arrive donc ainsi à réduire la gamme d'évanouissement effective au point de rendre inutile la répartition des brouillages à court terme. Comme il en résulte une diminution de la valeur maximale de C et, en conséquence, du brouillage I causé à un autre réseau, l'utilisation de l'orbite et du spectre peut s'en trouver améliorée.

4. Exemples de conception de liaisons à établir au-dessus de 10 GHz

Un système à satellite de 30/20 GHz peut admettre un accès multiple par répartition en fréquence, ou encore il peut fonctionner avec une seule porteuse par répéteur. Si le signal est très affaibli par la pluie, on peut prévoir le contrôle de la puissance sur la liaison montante du système, ou au contraire donner à cette puissance une valeur nominale suffisante pour que la liaison supporte un évanouissement même profond. Les mêmes solutions sont praticables pour un système de 14/12 GHz, bien qu'en général il ne soit pas sujet à des évanouissements aussi profonds (voir la Fig. 1) et que, par conséquent, on n'a pas à étudier son projet avec autant de rigueur pour l'éventualité d'évanouissements profonds.

Comme premier exemple, considérons le cas où:

- le système fonctionne dans les bandes 30/20 GHz;
- la liaison montante est à émission sans contrôle de la puissance et à réception sans diversité;
- la liaison descendante est à réception avec diversité, ce qui y rend négligeable l'influence des évanouissements;
- le satellite est équipé d'un répéteur courant à tubes à ondes progressives;
- les caractéristiques à obtenir sont conformes aux dispositions des Avis 353 et 466.

Comme c'est aux caractéristiques à court terme qu'est subordonnée l'étude de la liaison, le bruit thermique en l'absence d'évanouissement est très bas. Le Tableau I contient deux ensembles de caractéristiques possibles, qui correspondent l'un au fonctionnement AMRF à plusieurs porteuses et l'autre au fonctionnement à une seule porteuse par répéteur.

Si l'on compare les caractéristiques de cette liaison en l'absence et en présence de bruit d'intermodulation, on constate que celui-ci influence principalement la prestation à court terme, puisque c'est lui qui contribue le plus à l'accroissement du bruit total à court terme de 98×10^3 pW0p à 275×10^3 pW0p. Il convient aussi d'observer que l'on pourrait satisfaire dans cet exemple aux caractéristiques à court terme spécifiées dans l'Avis 353 à condition que la dégradation soit due au seul bruit thermique, mais non à son influence conjuguée avec celle d'un bruit d'intermodulation ou d'un brouillage entre réseaux, comme le stipule l'Avis 466 pour les bandes de fréquences inférieures à 15 GHz.

Comme second exemple, considérons le système précédent, mais avec contrôle partiel de la puissance sur la liaison montante, plus précisément avec la possibilité d'augmenter de 8,5 dB la puissance de la station terrienne émettrice afin de réduire les effets d'un évanouissement de 17,5 dB pendant 0,3% du temps sur cette liaison. Les caractéristiques de la liaison dans ce système figurent au Tableau II. Dans ce cas, on satisfait aux caractéristiques à court terme spécifiées dans l'Avis 353 quand on étudie le projet principalement pour des conditions à long terme et que la transmission est à une seule porteuse par répéteur, mais non si l'on fait fonctionner ce même système en AMRF, bien que le brouillage entre réseaux reste alors égal à 1/5 du bruit total.

Le Tableau III indique les caractéristiques d'un système semblable, mais qui fonctionne à 14/12 GHz, sans contrôle de la puissance d'émission ni réception en diversité d'espace sur la liaison montante. Ce système atteint les objectifs à court terme qui sont spécifiés dans l'Avis 353 malgré cette absence de contrôle et de diversité, à condition que sa conception satisfasse aux spécifications à long terme des Avis 353 et 466. Il n'en reste pas moins que, dans cet exemple aussi, les caractéristiques à court terme sont dégradées par un bruit d'intermodulation ne dépassant pas sa quote-part normale dans un système AMRF.

TABLEAU I – *Exemple de bilans de bruit, y compris le brouillage entre réseaux, en exploitation à plusieurs porteuses ou à une seule porteuse, la liaison montante étant sujette à évanouissements mais sans contrôle de la puissance*

(d'après des données de propagation recueillies à Halifax à 30 GHz)

Caractéristique de bruit(1)	Pendant 80% d'un mois (pW0p)		Pendant au plus 0,3% du mois le plus défavorable (pW0p)	
	Exploitation à plusieurs porteuses	Exploitation à une seule porteuse	Exploitation à plusieurs porteuses	Exploitation à une seule porteuse(2)
Intermodulation	2000	0	112400	0
Brouillage de la liaison montante	1000	1000	56200	56200
Brouillage de la liaison descendante	1000	1000	56200	15850
Bruit thermique sur la liaison montante	300	300	16870	16870
Bruit thermique sur la liaison descendante	600	600	33740	9510
Total	4900	2900	275410	98430

(1) Dans cet exemple, on suppose qu'il n'y a pas de brouillage causé par des systèmes de Terre.

(2) On suppose que le répéteur comporte une réduction de puissance de 12 dB à la sortie et de 17,5 dB à l'entrée.

TABLEAU II – *Exemple de bilans de bruit, y compris le brouillage entre réseaux, en exploitation à plusieurs porteuses ou à une seule porteuse, la liaison montante étant sujette à évanouissements mais dotée d'un contrôle partiel de la puissance*

(d'après des données de propagation recueillies à Halifax à 30 GHz

Caractéristiques de bruit(1)	Pendant 80% d'un mois (pW0p)		Pendant au plus 0,3% du mois le plus défavorable (pW0p)	
	Exploitation à plusieurs porteuses	Exploitation à une seule porteuse	Exploitation à plusieurs porteuses(2)	Exploitation à une seule porteuse(3)
Intermodulation	2 000	0	16 000	0
Brouillage de la liaison montante	1 000	1 000	8 000	8 000
Brouillage de la liaison descendante	1 000	1 000	8 000	3 200
Bruit thermique sur la liaison descendante	4 000	4 000	32 000	12 800
Total	10 000	8 000	80 000	40 000

(1) Dans cet exemple, on suppose qu'il n'y a pas de brouillage causé par des systèmes de Terre.

(2) On suppose que pour la liaison montante, le contrôle en puissance est de 8,5 dB et les évanouissements de 17,5 dB.

(3) On suppose que pour la liaison montante le contrôle en puissance est de 8,5 dB, ce qui correspond à une variation de puissance de 5 dB sur la liaison descendante (parce que la caractéristique du répéteur n'est pas linéaire), pour un évanouissement de 17,5 dB.

TABLEAU III – *Exemple de bilans de bruit, y compris le brouillage entre réseaux en exploitation à plusieurs porteuses ou à une seule porteuse, la liaison montante étant sujette à évanouissements mais sans contrôle de la puissance*

(d'après des données de propagation recueillies à Halifax à 14 GHz)

Caractéristique de bruit(1)	Pendant 80% d'un mois (pW0p)		Pendant au plus 0,3% du mois le plus défavorable (pW0p)	
	Exploitation à plusieurs porteuses	Exploitation à une seule porteuse	Exploitation à plusieurs porteuses	Exploitation à une seule porteuse(2)
Intermodulation	2 000	0	7 096	0
Brouillage de la liaison montante	1 000	1 000	3 548	3 548
Brouillage de la liaison descendante	1 000	1 000	3 548	2 000
Bruit thermique sur la liaison montante	2 000	2 000	7 096	7 096
Bruit thermique sur la liaison descendante	4 000	4 000	14 192	8 000
Total	10 000	8 000	35 480	20 644

(1) Dans cet exemple, on suppose qu'il n'y a pas de brouillage causé par des systèmes de Terre.

(2) On suppose que le répéteur comporte une réduction de puissance de 3 dB à la sortie et de 5,5 dB à l'entrée.

Pour une liaison descendante, on s'attend à une corrélation très marquée entre l'évanouissement du signal utile et l'évanouissemet des signaux brouilleurs provenant de satellites voisins, de sorte que le rapport bruit thermique/bruit de brouillage est constant pendant l'affaiblissement dû à la pluie.

5. Résumé

Les observations provisoires suivantes s'appliquent aux fréquences pour lesquelles l'évanouissement en cours de propagation est un facteur dominant dans les projets de liaison par satellite:

- en ce qui concerne l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre, il est préférable d'utiliser le contrôle de la puissance ou la diversité d'espace sur les liaisons montantes, de manière à réduire les brouillages à court terme;
- aux bandes de fréquences supérieures (par exemple, à 30/20 GHz), si l'on n'emploie pas le contrôle de la puissance ou la diversité d'espace sur la liaison montante, il y a peut-être lieu de répartir les brouillages à court terme. Cette répartition doit être choisie de manière à éviter tout effet préjudiciable sur l'utilisation de l'orbite et du spectre;
- étant donné que l'évanouissement augmente substantiellement quand la fréquence s'élève, une seule répartition des brouillages à court terme peut ne pas être suffisante pour toutes les bandes du service fixe par satellite au-dessus de 15 GHz.

Il est urgent de faire de nouvelles études de manière à obtenir de plus amples conclusions qualitatives et quantitatives en ce qui concerne les répartitions des brouillages pour les réseaux à satellite du service fixe par satellite au-dessus de 15 GHz. Dans ces études, il convient de tenir compte aussi des répartitions admises pour les brouillages causés par des services de Terre dans les bandes de fréquences où le partage avec le service fixe par satellite est permis.

SECTION 4C: CARACTÉRISTIQUES EN BANDE DE BASE

Avis et Rapports

AVIS 352-4

CIRCUIT FICTIF DE RÉFÉRENCE POUR LES SYSTÈMES UTILISANT LA TRANSMISSION ANALOGIQUE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1963-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

servir de guide à ceux qui conçoivent et réalisent le matériel et les systèmes destinés à être utilisés dans les réseaux de téléphonie et de télévision;

b) que l'on utilise ou envisage d'utiliser uniquement des satellites à grande altitude;

c) qu'avec de tels satellites la plupart des relations pourront ne comporter qu'une seule liaison par satellite, la nécessité d'avoir deux liaisons par satellite en cascade se présentant occasionnellement, en particulier pour la télévision;

d) que le fonctionnement global de chaque liaison par satellite ne dépend que peu de la distance entre les stations terriennes, comptée le long de l'arc de grand cercle;

e) que, pour éviter les effets des évanouissements, les stations terriennes peuvent assurer une réception en diversité d'emplacement, ce qui exige la mise en place de liaisons d'interconnexion de Terre entre des couples d'antennes;

f) que des liaisons satellite à satellite sont susceptibles d'être utilisées dans le service fixe par satellite,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. qu'un circuit fictif de référence pour les systèmes du service fixe par satellite utilisant la transmission analogique devrait se composer d'une liaison Terre-espace-Terre dont la portion spatiale peut comporter une ou plusieurs liaisons satellite à satellite.

2. que, pour les stations terriennes n'assurant pas la réception en diversité d'emplacement, l'entrée de ce circuit doit correspondre à l'entrée du modulateur réalisant le transfert de la bande de base à la porteuse radioélectrique et la sortie du circuit doit correspondre à la sortie du démodulateur réalisant l'opération inverse;

3. que les liaisons entre les stations terriennes et les centres de commutation qui leur sont associés ne doivent pas être incluses dans ce circuit fictif de référence;

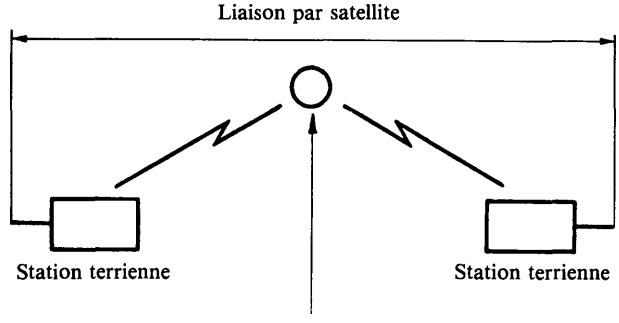


FIGURE 1 – *Circuit fictif de référence pour la transmission analogique*

4. que, pour les stations terriennes assurant une réception en diversité d'emplacement, le circuit fictif de référence doit aussi comporter les liaisons de Terre nécessaires à cette fin ainsi que, le cas échéant, des modulateurs et/ou des démodulateurs supplémentaires; on admettra alors que la jonction entre le système de Terre et le système à satellite est située dans la bande de base, après le point de commutation de la réception en diversité;

5. que les liaisons de Terre entre les points de commutation pour réception en diversité d'emplacement dans ces stations terriennes et les centres de commutation associés ne devraient pas être incluses dans le circuit fictif de référence.

AVIS 353-4

PUISSANCE DE BRUIT ADMISSIBLE DANS LE CIRCUIT FICTIF DE RÉFÉRENCE POUR LA TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1963-1966-1970-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le circuit fictif de référence est destiné à servir de guide à ceux qui conçoivent et réalisent les systèmes utilisés dans la pratique;

b) que les frais d'établissement et de maintenance de systèmes du service fixe par satellite dépendent étroitement de la qualité de fonctionnement requise au point de vue du rapport signal/bruit global;

c) que la puissance totale du bruit sur le circuit fictif de référence ne doit pas gêner sensiblement la conversation dans la plupart des communications téléphoniques, ni la transmission de la signalisation téléphonique;

d) que l'on ne peut pas évaluer pleinement l'importance des évanouissements avant de disposer de données expérimentales, mais que l'on ne s'attend pas qu'elle soit appréciable dans les systèmes du service fixe par satellite;

e) qu'il peut exister d'autres sources de bruit de courte durée,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que la puissance du bruit en un point de niveau relatif zéro dans n'importe quelle voie téléphonique du circuit fictif de référence défini dans l'Avis 352 ne dépasse pas les valeurs provisoires ci-après:

1.1 10 000 pW0p, puissance psophométrique moyenne, pendant une minute, pendant plus de 20% d'un mois quelconque;

1.2 50 000 pW0p, puissance psophométrique moyenne, pendant une minute, pendant plus de 0,3% d'un mois quelconque;

1.3 1 000 000 pW0, puissance non pondérée (avec un temps d'intégration de 5 ms) pendant plus de 0,01% d'une année quelconque.

2. que les notes qui suivent soient considérées comme faisant partie de l'Avis:

Note 1. – Les bruits intérieurs à l'équipement de multiplexage par répartition en fréquence sont exclus de ce qui précède. Pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence, l'équipement nécessaire au transfert de la bande de base du satellite, à partir du niveau de multiplexage requis pour l'interconnexion à une liaison de Terre ou pour aboutir à ce niveau, introduit un bruit dont la valeur s'ajoute aux valeurs ci-dessus. Lorsque l'on considère la qualité d'une communication globale, le bruit introduit par cet équipement doit être ajouté aux valeurs indiquées au § 1 du point 1. La contribution de bruit autorisée par le CCITT pour l'équipement de multiplexage est spécifiée au § 4 de l'Avis G.222 du CCITT.

Note 2. – On admet que les pointes de bruit et les clics dus aux dispositifs d'alimentation et aux appareils de commutation (y compris la commutation de satellite à satellite) sont réduits à des proportions négligeables et que l'on n'en tiendra pas compte dans les calculs de bruit.

Note 3. – Lorsqu'on applique la notion de circuit fictif de référence et la notion de bruit admissible de circuit dans la conception de l'équipement des satellites et des stations terriennes pour une certaine valeur du rapport signal/bruit global, il convient d'utiliser, le cas échéant, les caractéristiques préférées par le CCIR, telles qu'elles sont exposées dans les Avis de ce Comité; dans les cas où plusieurs valeurs sont recommandées, l'ingénieur qui conçoit le système indique la valeur qu'il a choisie; en l'absence de valeurs préférées, il indique les hypothèses qu'il a faites.

Note 4. – Pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence, on admettra que le signal dans la bande de base, au cours de l'heure chargée, peut être représenté par un signal à spectre uniforme, dont le niveau absolu de puissance, en un point de niveau relatif zéro, est $(-15 + 10 \log N)$ dBm pour 240 voies ou plus, et $(-1 + 4 \log N)$ dBm * quand le nombre de voies est compris entre 12 et 240, N étant le nombre de voies. Ces formules s'appliquent uniquement aux signaux dans la bande de base, sans préaccentuation, et avec utilisation d'amplificateurs ou de répéteurs indépendants pour les deux sens de transmission. Pour plus de renseignements sur la charge conventionnelle, en particulier dans le cas d'un répéteur commun aux deux sens de transmission, voir l'Avis G.223 du CCITT.

Note 5. – Il n'est pas encore possible de faire des propositions concrètes quant aux conditions qu'il y aurait lieu de respecter dans les cas où l'on devrait assurer la transmission de télégraphie harmonique ou de données sur des voies téléphoniques d'un système du service fixe par satellite.

Note 6. – La puissance de bruit indiquée au § 1 ci-dessus devrait inclure les bruits dus aux brouillages (voir les Avis 356 et 466 lorsque cela s'y rapporte) et les bruits qui résultent de l'absorption atmosphérique et de l'augmentation de la température de bruit due à la pluie. Toutefois, dans certains cas, des bruits supplémentaires pourront entraîner un léger dépassement des objectifs généraux. On ne doit pas s'en inquiéter outre mesure, pourvu que les dispositions de l'Avis G.222, § 2.6, du CCITT soient respectées.

Note 7. – La valeur donnée au § 1.3 peut être parfois dépassée en raison de brouillages causés par la présence du Soleil dans le faisceau de l'antenne, mais, étant donné le caractère prévisible de ces brouillages, il n'en est pas question dans le présent Avis. Des renseignements détaillés à ce sujet figurent à l'Annexe II du Rapport 390.

Note 8. – Les objectifs fixés dans le présent Avis sont des objectifs de qualité distincts des objectifs de disponibilité.

Note 9. – Il peut être nécessaire de prendre des mesures spéciales concernant la qualité des liaisons intersatellites. L'ampleur de ces mesures reste à étudier.

Note 10. – Les courtes interruptions (de moins de 10 secondes) seront considérées comme équivalant au cas où la puissance de bruit d'un circuit dépasse 10^6 pW0 (valeur non pondérée).

Note 11. – Il est souhaitable que les projets de systèmes soient établis d'après des données de propagation portant sur une période d'au moins quatre ans. Il convient que la qualité qu'il est recommandé d'obtenir «pendant une année quelconque» soit fondée sur des statistiques de propagation cumulées établies pour toutes les années complètes pour lesquelles on dispose de données fiables. La qualité qu'il est recommandé d'obtenir «pendant un mois quelconque» devrait être fondée sur les données de propagation correspondant à la valeur médiane «pendant le plus mauvais mois de l'année», valeur extraite des statistiques mensuelles pour toutes les années pour lesquelles on dispose de données fiables.

AVIS 354-2

LARGEUR DE LA BANDE VIDÉOFRÉQUENCE ET NIVEAU DE BRUIT ADMISSIBLE DANS LE CIRCUIT FICTIF DE RÉFÉRENCE POUR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE **

(Question 2/4)

(1963-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le circuit fictif de référence est destiné à servir de guide à ceux qui conçoivent et réalisent les systèmes utilisés dans la pratique;

b) que les frais d'établissement et de maintenance d'un système du service fixe par satellite dépendent très étroitement de la largeur de bande vidéofréquence et du rapport signal/bruit global, et qu'il convient donc que ces deux grandeurs ne soient pas supérieures à ce qui est strictement nécessaire pour une transmission acceptable;

c) qu'il est souhaitable que le niveau de bruit dans les transmissions par satellite ne dépasse pas celui admissible dans les transmissions internationales par voie de Terre (voir l'Avis 567);

---

* On estime que ces formules fournissent une bonne approximation pour le calcul du bruit d'intermodulation quand $N \geqslant 60$. Toutefois, pour des systèmes à petit nombre de voies, les résultats de mesures effectuées avec un bruit erratique à spectre uniforme sont plus éloignés de la réalité, en raison de la grande différence qui existe entre la nature du signal réel et celle du signal de mesure.

** Ces spécifications ont un caractère provisoire. Par la Question 13/CMTT et le Programme d'études 13D/CMTT, la CMTT invite, en effet, les administrations à rechercher les caractéristiques du circuit fictif de référence pour la transmission de télévision par satellite.

d) qu'il est souhaitable que les stations spatiales du service fixe par satellite transmettent les programmes internationaux de télévision avec la norme et le système de télévision d'origine, afin d'assurer une qualité de service aussi bonne que possible conformément au Vœu 38,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que, dans le circuit fictif de référence pour les stations spatiales du service fixe par satellite défini dans l'Avis 352, la limite supérieure nominale de la bande des fréquences vidéo soit compatible avec celle nécessaire pour le ou les systèmes de télévision à transmettre (voir l'Avis 567);

2. que les rapports signal/bruit pondéré pour des parasites erratiques continus à l'extrémité du circuit fictif de référence défini dans l'Avis 352 doivent être provisoirement égaux à ceux recommandés pour le circuit fictif de référence terrestre de 2500 km dans l'Avis 567 pour la norme de télévision appropriée.

Note 1. – La CMTT se propose d'étudier les définitions et les caractéristiques des circuits auxiliaires à associer aux circuits image et son (Programme d'études 17C/CMTT).

Note 2. – Dans l'application du § 2 du présent Avis, on attachera une attention particulière à la Note 2 * du § 1.2 de l'Avis 421-3 (Genève, 1974) en ce qui concerne le bruit dans le circuit fictif de référence.

Note 3. – Le bruit spécifié ci-dessus doit englober le bruit de brouillage défini dans l'Avis 483.

RAPPORT 208-5

CONSTITUTION DU CIRCUIT FICTIF DE RÉFÉRENCE ET NORMES CONCERNANT LE NIVEAU ADMISSIBLE DE BRUIT POUR LA TRANSMISSION DE TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE ET DE TÉLÉVISION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982)

1. Constitution du circuit fictif de référence

L'Avis 352 contient les spécifications d'un circuit fictif de référence analogue à celui qui a été adopté pour les liaisons de Terre à grande distance, destinées à ceux qui auront à concevoir et à réaliser le matériel pour le service fixe par satellite. Ce circuit fictif de référence aide à spécifier, à concevoir et à maintenir les performances et les caractéristiques d'un système au point où il est utilisé et au point de jonction avec d'autres systèmes.

Le circuit fictif de référence destiné aux systèmes du service fixe par satellite comporte une seule liaison spatiale par satellite géostationnaire. Outre la téléphonie, le circuit fictif de référence est applicable à d'autres types de signaux, tels que la télévision et les données lorsque leur transmission s'effectue dans le service fixe par satellite.

En ce qui concerne la télévision, la définition et les caractéristiques des chaînes de référence comportant un ou plusieurs circuits fictifs de référence et correspondant à divers types de service ont été étudiées par la CMTT; elles sont spécifiées dans les Avis 354 et 567.

Les travaux de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, Genève, 1971, ont révélé de nouveaux facteurs dont il faut tenir compte lors de la constitution des circuits fictifs de référence. Le premier est l'introduction d'un service inter-satellites qui peut assurer des liaisons entre les satellites et le service fixe par satellite. Bien que l'on n'ait pas réalisé de systèmes avec liaisons inter-satellites, il est certain que ces systèmes auront des temps de propagation et des niveaux de bruit plus élevés.

Le deuxième facteur est la nouvelle attribution au service fixe par satellite des fréquences 11, 14, 18 et 30 GHz. A cet égard, les études préliminaires indiquent qu'il faudra prévoir une réception en diversité d'espace pour les stations terriennes où l'affaiblissement dû aux précipitations crée des problèmes majeurs. Cela nécessitera des interconnexions de Terre, ce qui augmentera le niveau de bruit (voir l'Avis 352).

---

* *Note du Secrétariat:* Cette Note a été supprimée dans l'Avis 567 qui remplace l'Avis 421-3.

2. Normes de niveau de bruit admissible

2.1 *Considérations générales*

Les normes concernant les niveaux de bruit admissible dans le circuit fictif de référence pour le service fixe par satellite doivent être du même ordre de grandeur que celles qui ont été adoptées pour les autres systèmes de télécommunication à grande distance, et les principes établis par la Commission mixte CMBD (CCITT/CCIR) pour les bruits de circuits téléphoniques et la CMTT pour la transmission de télévision à grande distance sont pertinents.

Les critères applicables à la puissance maximale admissible de bruit à court terme, définie dans les Avis 353 et 356, sont fondés sur ceux qui sont applicables aux circuits des services de Terre. Toutefois, si l'on considère le bruit thermique seul, pour les bandes de fréquences de 4 et 6 GHz, le pourcentage du temps pendant lequel la puissance de 50 000 pW0p est dépassée peut être notablement inférieur à la valeur de 0,3% permise par l'Avis 353. L'expérience acquise dans l'exploitation de systèmes dans ces bandes tend à confirmer ce fait.

Ces conclusions peuvent d'ailleurs n'être pas applicables à des systèmes fonctionnant dans des bandes de fréquences plus élevées, puisqu'ils subissent à la fois une augmentation de l'affaiblissement dû à la pluie et une élévation sensible de leur température de bruit. La température de bruit du système de réception d'une station terrienne, à la sortie de l'antenne de réception, est donnée par la formule:

$$T = FT_e + \frac{(1-F)}{a_r a_g}\left[T_c + T_a\,(a_r a_g - 1)\right] + (w-1)\,T_w + wT_r \qquad \text{K} \qquad (1)$$

où:

T_e: température effective, en K, du terrain entourant la station terrienne;

T_c: température en K, du rayonnement céleste;

T_a: température effective, en K, du milieu absorbant (gaz, nuages, pluie);

T_w: température, en K, du guide d'ondes ou de la ligne de transmission connectant le terminal de l'antenne au récepteur;

T_r: température de bruit effective, en K, du récepteur et des étages suivants, rapportée à l'entrée du récepteur;

F: gain d'antenne par rapport au gain d'une antenne isotrope, intégré sur toutes les composantes de directivité qui sous-tendent le terrain avoisinant («facteur d'interception du sol»);

a_r: facteur d'absorption de la pluie, ou d'autres hydrométéores, le long de l'axe du lobe principal;

a_g: facteur d'absorption des gaz atmosphériques, le long de l'axe du lobe principal;

w: facteur d'affaiblissement du guide d'ondes ou de la ligne de transmission;

En l'absence de pluie ($a_r = 1{,}00$), les deux premiers termes du membre de droite de l'égalité (1) peuvent être combinés pour donner la température de bruit de l'antenne par ciel clair T_{ant}, et l'on peut utiliser l'expression simplifiée qui suit pour la température de bruit du système de réception par temps clair:

$$T_0 = T_{ant} + (w-1)T_w + wT_r \qquad \text{K} \qquad (2)$$

La Fig. 1 représente un exemple de la dégradation, sur une liaison descendante d'un réseau, du rapport porteuse/bruit thermique, en fonction de l'affaiblissement dû à l'absorption par des hydrométéores, pour plusieurs valeurs de la température de bruit du récepteur.

L'information nécessaire pour déterminer les affaiblissements dus à la pluie dans différentes régions et pour différentes bandes de fréquences se trouve dans le Volume V du CCIR, aux sections relatives à la radiométéorologie et aux télécommunications spatiales.

Il serait intéressant de poursuivre l'étude des critères de bruit à court terme pour les systèmes à satellites, à la lumière du comportement effectif de ces derniers eu égard à la transmission, mais en gardant présents à l'esprit les principes pertinents qui ont été établis par la Commission spéciale mixte CMBD du CCITT et du CCIR et par la CMTT, en tenant compte aussi du comportement de systèmes utilisant des bandes de fréquences autres que celles des 4 et 6 GHz. De même, il faudrait poursuivre les études pour tenir compte des mécanismes des évanouissements autres que ceux dus aux hydrométéores, du fait qu'on a observé récemment que les signaux reçus à certaines stations terriennes peuvent être affectés par une scintillation ionosphérique et troposphérique.

2.2 *Bruit admissible dans le circuit fictif de référence: téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence*

En plus des considérations générales ci-dessus, on a rédigé l'Avis 353 en s'inspirant des conseils de la Commission mixte CMBD CCITT/CCIR. La valeur maximale de 10 000 pW0p (puissance psophométrique) du bruit moyen pendant une heure quelconque, dans n'importe quelle voie téléphonique du circuit fictif de référence, correspondrait à 1,3 pW/km sur une distance de 7500 km, calculée sur un arc de grand cercle. Cet objectif est du même ordre de grandeur que ceux recommandés pour d'autres moyens de transmission à grande distance, ainsi que pour d'autres périodes d'intégration, à savoir 1 min et 5 ms. Toutefois, il faudra aussi prendre en considération les deux facteurs mentionnés au § 1 car ils influeront sur les spécifications de cet Avis.

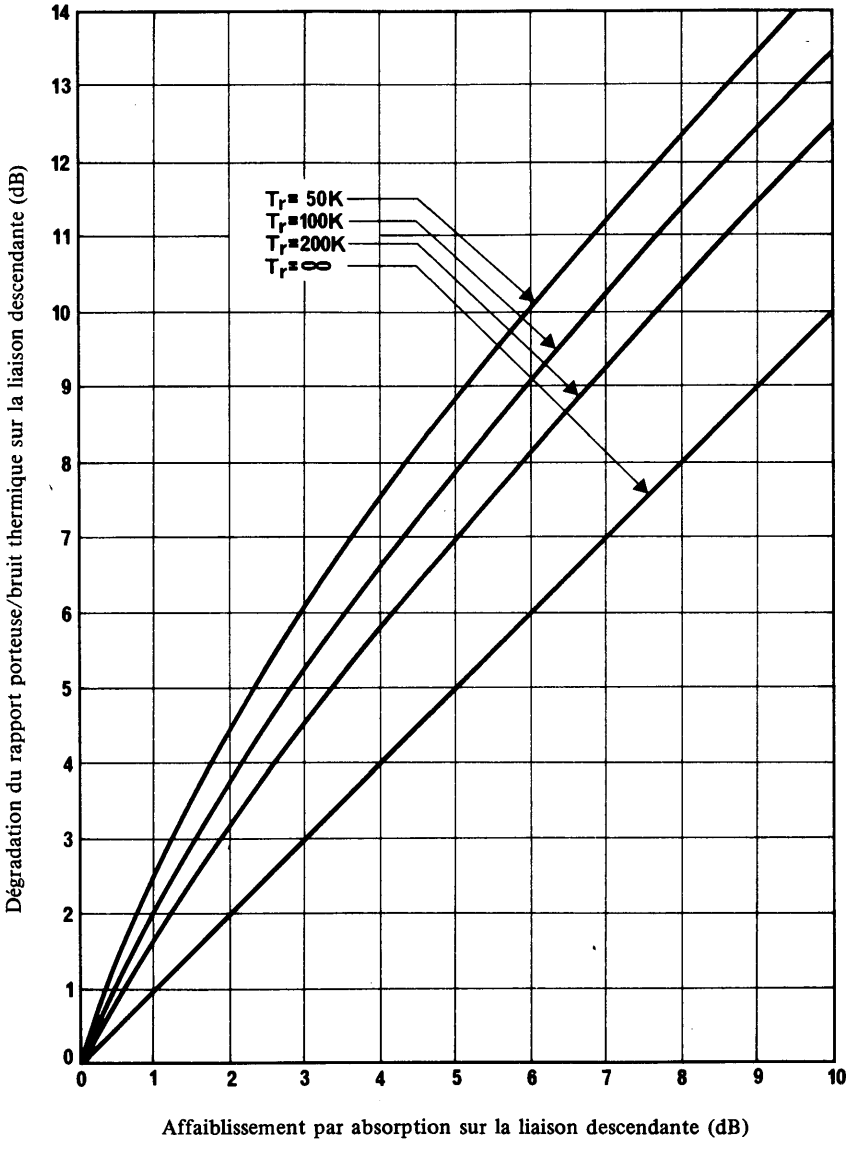


FIGURE 1 – *Dégradation du rapport porteuse/bruit thermique sur la liaison descendante, sous l'effet de l'affaiblissement par absorption sur cette liaison*

$T_e = T_w = 290$ K $\quad w = 1{,}1$

$T_c = 3$ K $\quad a_g = 1{,}07$

$T_a = 280$ K $\quad F = 0{,}05$

Pour des circuits de certaines classes, qui sont utilisés sur des liaisons directes à grande distance, mais ne sont pas destinés à faire partie d'une liaison internationale, il peut être souhaitable d'augmenter les valeurs allouées au bruit moyen dans le circuit fictif de référence. Les raisons que l'on a d'envisager cette élévation des niveaux de bruit admissible sont brièvement analysées dans l'Annexe I au présent Rapport pour faciliter la tâche des administrations intéressées.

2.3 *Bruit admissible dans le circuit fictif de référence: télévision*

Il est probable que la plupart des circuits internationaux de télévision ne comprendront qu'une seule liaison par satellite, deux liaisons de ce type étant toutefois indispensables pour les connexions les plus longues à l'échelle du globe. Dans ces conditions, il serait provisoirement tout à fait suffisant que le bruit erratique continu à l'extrémité du circuit fictif de référence soit égal à celui du circuit fictif de référence terrestre de 2500 km, les valeurs précises dépendant de la norme du système de télévision considéré (voir l'Avis 567).

3. Largeur de la bande des fréquences vidéo dans le circuit fictif de référence

En rédigeant l'Avis 354 sur la limite supérieure nominale de la bande des fréquences vidéo dans un système du service fixe par satellite pour transmission de télévision, on a tenu compte des points suivants:

- la largeur de la bande des fréquences vidéo devrait être suffisante pour permettre la transmission, dans des conditions acceptables, de signaux de télévision jusqu'à et y compris ceux de la norme à 625 lignes;
- la nécessité, justifiée par des raisons d'ordre économique, de ne pas prévoir une largeur de bande des fréquences vidéo supérieure à ce qui est strictement nécessaire;
- l'intérêt qu'il y a à ce que la largeur de la bande de base pour une transmission de télévision soit compatible avec celle d'une transmission de téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence de grande capacité.

Compte tenu des facteurs ci-dessus, il est recommandé que, dans le circuit fictif de référence pour transmission de télévision, la bande des fréquences vidéo soit compatible avec celle nécessaire pour le ou les systèmes de télévision considérés.

4. Transmission simultanée d'une voie son et d'une image de télévision

Afin d'éviter des différences excessives entre le temps de transmission d'un signal d'image de télévision et celui du signal son correspondant, il y a avantage à les transmettre tous deux sur la même liaison par satellite. S'il en est ainsi, on pourra avoir besoin d'une bande de base un peu plus large afin de pouvoir y introduire le signal son (par exemple, sur une sous-porteuse séparée située dans la bande de base). Une autre solution consisterait à transmettre le signal son en multiplexage par répartition dans le temps avec le signal vidéo, par exemple en utilisant les impulsions de synchronisation ou les intervalles de suppression, sans qu'il soit nécessaire d'augmenter la largeur de la bande de base. Le son pourrait être transmis également par voie radioélectrique sur le même satellite.

ANNEXE I

OBJECTIFS DE BRUIT POUR LES CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES A SATELLITE, COMPTE TENU DES PRÉFÉRENCES DES USAGERS

1. Introduction

Sur les circuits et les voies téléphoniques de Terre, le bruit dépend essentiellement de la longueur du circuit, aussi a-t-on été amené à spécifier le bruit affectant les circuits de Terre en fonction de la distance franchie par le circuit, augmentée d'un apport de bruit constant dû à celles des caractéristiques du matériel et du brouillage qui ne dépendent pas de la distance.

Cependant, si l'on analyse les principes de la méthode suivie pour déterminer les normes de bruit sur les circuits de Terre, on s'aperçoit que l'élément le plus important est la qualité du service assuré aux usagers du téléphone dans des conditions normales ainsi que dans les plus mauvaises rencontrées dans le réseau.

Alors que la qualité de transmission sur les circuits de Terre est étroitement subordonnée à la distance, le bruit et l'affaiblissement des circuits à satellite en sont plus ou moins indépendants. Il semblerait donc plus rationnel de fixer dans ce cas une valeur ou une gamme de valeurs qui assureront des communications satisfaisantes quelles que soient les distances franchies par les circuits à satellite. Ceci étant, il peut être souhaitable d'étudier la possibilité de s'écarter des niveaux de bruit admissibles spécifiés par l'Avis 353 et l'influence de cet écart sur la qualité des liaisons téléphoniques empruntant un réseau à satellite utilisé pour un service national.

2. Solutions pratiques possibles pour l'établissement de circuits à satellite

Il ressort d'une analyse critique présentée par l'Australie pendant la période 1974-78 que, pour certaines classes de circuits utilisés dans les conditions nationales du trafic, on peut modifier les normes appliquées généralement aux circuits téléphoniques internationaux par satellite pour obtenir un certain avantage économique tout en assurant un service adéquat à l'intérieur d'un pays. Il ne sera pas possible de tirer avantage de ces modifications pour toutes les connexions, et il peut être indispensable de prendre des dispositions particulières pour respecter les conditions imposées à l'échelon international. Il s'agit, bien entendu, du trafic national pour lequel des normes supérieures à celles que spécifie l'Avis 353 devront peut-être être appliquées.

Cette analyse a tenu compte de trois types de liaisons:

a) circuits conformes à l'Avis 353 («circuits à 10 000 pW0p»);

b) assouplissement de 3 dB («circuits à 20 000 pW0p»);

c) assouplissement de 6 dB («circuits à 40 000 pW0p»).

On pourrait prévoir un émetteur-récepteur distinct pour chaque classe de circuit à satellite ou utiliser, quelle que soit la classe, un même émetteur-récepteur muni d'un dispositif mixte. Les changements de capacité en voies auxquels on peut s'attendre quand on utilise une valeur autre que 10 000 pW0p dépendent de la configuration du système considéré; cette augmentation peut atteindre 100% du nombre total de voies de l'émetteur-récepteur en échange de l'assouplissement de 6 dB de la règle de l'Avis 353 [Feder, 1976].

Il peut aussi être souhaitable de prévoir des sections à apport de bruit minime, qui se prêtent à une connexion permanente avec des prolongements de terre très longs. Par exemple, de telles sections pourraient satisfaire à la norme de l'Avis 353. Elles pourraient alors être prolongées par des circuits de transit de Terre de 6500 km.

On peut encore s'arranger pour écouler par les seuls circuits de Terre, dans la mesure du possible, tout le trafic à destination ou en provenance du réseau international, ce qui permet de prévoir presque exclusivement des circuits de la classe c) et un très petit nombre de circuits des autres classes. Cette solution aurait l'avantage de simplifier les dispositifs de commutation des circuits de prolongement du réseau international qui sont nécessaires pour éviter d'établir des liaisons comprenant un nombre excessif de relais par satellite.

Enfin, s'il est acceptable d'utiliser des circuits à satellite affectés d'un bruit de 40 000 ou 20 000 pW0p au lieu de 10 000 pW0p, valeur normalisée pour les circuits, il conviendrait de réexaminer à la fois l'attribution totale de bruit non thermique (qu'on suppose fixée à 6000 pW0p) et la composante de brouillage dans ce bruit non thermique (supposée égale à 2000 pW0p). Il va de soi que si l'on pouvait augmenter l'apport de bruit de brouillage, donc aussi celui de bruit non thermique, aux dépens du bruit thermique, l'assouplissement des conditions imposées par la coordination au système à satellites pourrait entraîner des économies.

3. Conclusions

Lors de la fixation d'objectifs de bruit sur le réseau de Terre, il convient de reconnaître les conditions les plus défavorables et les conditions moyennes qui peuvent se rencontrer et dépendent généralement de la distance franchie par une liaison. Dans les limites des normes de bruit global actuellement recommandées par le CCITT, on peut choisir pour les circuits par satellite des normes qui devraient assurer une qualité de fonctionnement équivalente ou un peu meilleure que celle de communications de Terre à grande distance qui leur sont comparables. Essentiellement, on envisage que l'allocation de bruit pour un circuit par satellite corresponde à l'allocation de bruit des systèmes de Terre qu'il remplace théoriquement. Si des conditions particulières imposent des circuits de meilleure qualité, on peut y satisfaire par une disposition adéquate. On a démontré que cette méthode de fixation des objectifs pour les circuits à satellite, au lieu de l'application pure et simple de la norme de l'Avis 353, conduit éventuellement à une augmentation de la capacité en voies d'un système donné et, par suite, à une réduction des frais d'exploitation par voie de ce système ou à une réduction du coût global du système pour une capacité en voies donnée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FEDER, A. [1976] Transmission performance objectives for national satellite telephone circuits. *Austral. Telecomm. Res.*, Vol. 10, **2**, 59-74.

AVIS 521-1

CONDUIT NUMÉRIQUE FICTIF DE RÉFÉRENCE POUR LES SYSTÈMES UTILISANT LA TRANSMISSION NUMÉRIQUE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2N/4)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il y a intérêt à établir un conduit numérique fictif de référence pour les systèmes actifs du service fixe par satellite qui puisse servir de guide à ceux qui conçoivent et réalisent le matériel pour les systèmes destinés à être utilisés dans les réseaux utilisant les techniques de transmission numérique;

b) que la plupart des connexions pourront être réalisées avec une seule liaison par satellite, occasionnellement avec deux liaisons en cascade;

c) que des liaisons satellite à satellite sont susceptibles d'être utilisées dans le service fixe par satellite;

d) que les liaisons par satellite utilisant la transmission numérique devraient faire partie du réseau numérique international plésiochrone qui a été recommandé;

e) que, l'on utilise ou envisage d'utiliser uniquement des satellites géostationnaires;

f) que les variations du temps de transmission causées par le mouvement des satellites par rapport à la Terre sont particulièrement importantes dans un réseau plésiochrone;

g) qu'un certain nombre de nouvelles techniques telles que l'AMRT (accès multiple par répartition dans le temps) et la CNP (concentration numérique de la parole) sont en cours de mise au point pour être utilisées sur les liaisons numériques par satellite;

h) que des signaux de multiplexage numérique du premier ordre et d'ordre supérieur peuvent être transmis sur des liaisons numériques par satellite;

j) que les problèmes posés par l'utilisation de liaisons numériques par satellite dans un réseau international plésiochrone sont encore à l'étude au CCITT,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que le conduit numérique fictif de référence pour les systèmes du service fixe par satellite utilisant la transmission numérique devrait se composer d'une liaison Terre-espace-Terre dont la portion spatiale pourrait comporter une ou plusieurs liaisons satellite à satellite;

2. que ce conduit numérique fictif de référence devrait comprendre les équipements indiqués dans la Fig. 1, qui sont nécessaires à la jonction avec le réseau de Terre aux niveaux de multiplexage primaire recommandés par le CCITT (Avis G.732 et G.733);

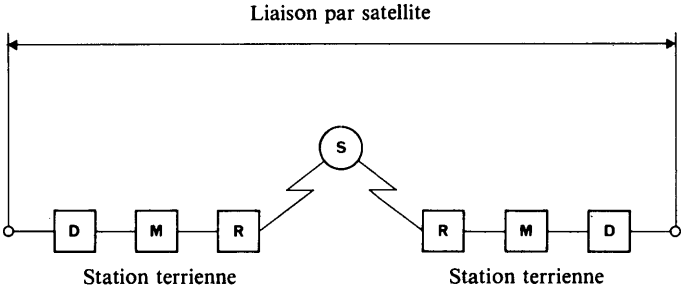


FIGURE 1 – *Conduit numérique fictif de référence*

S : station spatiale du service fixe par satellite, ou stations spatiales de ce service interconnectées par des liaisons satellite à satellite

D : équipement de jonction numérique directe (EJND)

M : équipement de modem (y compris, le cas échéant, l'équipement AMRT)

R : équipement FI/RF

3. que l'équipement de la jonction numérique directe devrait comprendre tous les appareils nécessaires pour compenser les effets de la variations du temps de propagation sur la liaison par satellite;

4. que les liaisons entre les stations terriennes et les centres de commutation numériques associés à ces stations ne devraient pas faire partie de ce conduit numérique fictif de référence;

5. que, pour les stations terriennes assurant une réception en diversité d'emplacement, le conduit numérique fictif de référence devrait aussi comporter les liaisons de Terre ainsi que tous les équipements associés nécessaires pour connecter ces stations terriennes au point de commutation de diversité.

Note 1. – Les systèmes numériques à une seule voie par porteuse ne sont pas pris en considération aux fins du présent Avis.

Note 2. – Dans le cas où une partie de l'équipement de la jonction numérique est située au centre de transit (CT), il y a lieu de poursuivre l'étude pour savoir si les fonctions correspondantes doivent être incluses dans ce conduit numérique fictif de référence.

AVIS 522-1

VALEURS ADMISSIBLES DU TAUX D'ERREUR SUR LES ÉLÉMENTS BINAIRES A LA SORTIE DU CONDUIT NUMÉRIQUE FICTIF DE RÉFÉRENCE DES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISANT LA MODULATION PAR IMPULSIONS ET CODAGE POUR LA TÉLÉPHONIE

(Programme d'études 2N/4)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le conduit numérique fictif de référence est destiné à servir de guide à ceux qui conçoivent et réalisent les systèmes utilisés dans la pratique;

b) que les frais d'établissement et de maintenance de systèmes numériques à satellites dépendent étroitement des performances globales en matière de taux d'erreur sur les éléments binaires;

c) que le taux d'erreur sur les éléments binaires, sur le conduit numérique fictif de référence, ne doit pas gêner sensiblement la conversation dans la plupart des communications téléphoniques, ni la transmission de la signalisation téléphonique;

d) que le taux d'erreur sur les éléments binaires peut varier dans le temps par suite des variations des conditions de propagation;

e) que le taux d'erreur sur les éléments binaires peut prendre des valeurs élevées pendant de brefs instants en raison du bruit dû à d'autres sources, telles que le brouillage,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que le taux d'erreur sur les éléments binaires à la sortie du conduit numérique fictif de référence défini dans l'Avis 521 ne devrait pas dépasser les valeurs provisoires ci-après:

1.1 1×10^{-6}, valeur moyenne sur dix minutes, pendant plus de 20% d'un mois quelconque;

1.2 1×10^{-4}, valeur moyenne sur une minute, pendant plus de 0,3% d'un mois quelconque;

1.3 1×10^{-3}, valeur moyenne sur une seconde, pendant plus de 0,01% d'une année quelconque;

2. que les notes qui suivent soient considérées comme faisant partie de l'Avis.

Note 1. – Le présent Avis a trait uniquement aux effets des erreurs aléatoires sur les éléments binaires. On peut maintenant considérer que cet Avis s'applique également aux erreurs groupées, mais les spécifications à ce sujet doivent faire l'objet d'un complément d'étude.

Note 2. – On admet que les erreurs provoquées par les pointes de bruit et les clics dus aux dispositifs d'alimentation et aux appareils de commutation (y compris de satellite à satellite) sont réduits à des proportions négligeables et qu'il est inutile d'en tenir compte dans les calculs.

Note 3. – Par comparaison avec les systèmes analogiques, la qualité d'un système numérique à satellite est généralement beaucoup plus affectée par une variation de la qualité dans la partie radioélectrique du réseau. Il est donc particulièrement important, pour maintenir le degré de qualité recommandé, que ceux qui conçoivent les systèmes prévoient des marges suffisantes en prévision des dégradations qui peuvent se produire pendant la durée de vie du système.

Note 4. – Les objectifs de taux d'erreur indiqués au point 1 du dispositif doivent tenir compte des effets produits par le bruit dû au brouillage et le bruit résultant de l'absorption atmosphérique et de la pluie.

Note 5. – On admet que la liaison par satellite ne transmet aucune information de verrouillage de trame en dehors de celle qui est nécessaire au bon fonctionnement du système à satellites. Si une information de verrouillage de trame dans un système multiplex MIC doit être transmise sans modification par la liaison à satellite, il convient de tenir compte de l'effet possible des taux d'erreur élevés (§ 1.2 et 1.3) sur les dispositifs d'indication d'alarme des systèmes de Terre.

Note 6. – Les objectifs de taux d'erreur indiqués au point 1 du dispositif ne s'appliquent qu'aux transmissions téléphoniques MIC (voir l'Avis G.711 du CCITT). La Commission d'études 4 du CCIR devra poursuivre l'étude des objectifs de qualité appropriés à la transmission dans des services à modulation numérique autres que la téléphonie MIC, au fur et à mesure que le CCIR aura connaissance des spécifications de qualité pour ces services.

Note 7. – On attire spécialement l'attention sur le fait qu'il est souhaitable de coordonner les dispositions de cet Avis avec les critères globaux de qualité mentionnés dan l'Avis G.821 du CCITT et les critères de qualité des faisceaux hertziens de l'Avis 594.

Note 8. – Les objectifs exposés dans le présent Avis sont des objectifs de qualité distincts des objectifs de disponibilité.

Note 9. – Il peut être nécessaire de prendre des mesures spéciales concernant la qualité des liaisons satellite à satellite. L'ampleur de ces mesures reste à étudier.

Note 10. – Les courtes interruptions (de moins de 10 secondes) seront considérées comme équivalant au cas où le taux d'erreur sur les bits dépasse 10^{-3}.

Note 11. – Il est souhaitable que les projets de systèmes soient établis d'après des données de propagation portant sur une période d'au moins quatre ans. Il convient que la qualité qu'il est recommandé d'obtenir «pendant une année quelconque» soit fondée sur des statistiques de propagation cumulées établies pour toutes les années complètes au sujet desquelles on dispose de données fiables.

La qualité qu'il est recommandé d'obtenir «pendant un mois quelconque» devrait être fondée sur les données de propagation correspondant à la valeur médiane «pendant le plus mauvais mois de l'année», valeur extraite des statistiques mensuelles pour toutes les années pour lesquelles on dispose de données fiables.

AVIS 446-2

DISPERSION DE L'ÉNERGIE DE LA PORTEUSE POUR DES SYSTÈMES EMPLOYANT UNE MODULATION ANGULAIRE PAR DES SIGNAUX ANALOGIQUES OU UNE MODULATION NUMÉRIQUE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2D/4)

(1966-1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'utilisation de techniques de dispersion de l'énergie des porteuses dans les systèmes du service fixe par satellite peut conduire à une réduction sensible des brouillages causés aux stations d'un service de radiocommunication de Terre qui fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences;

b) que, dans de nombreux cas, l'utilisation de telles techniques peut conduire à une réduction, parfois modérée, parfois sensible, des brouillages entre systèmes du service fixe par satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences; par contre, dans d'autres cas, l'utilisation de ces techniques risque de ne pas conduire à la réduction des brouillages entre de tels systèmes;

c) que ces techniques sont couramment utilisées avec succès dans les systèmes du service fixe par satellite, sans dégradation sensible de la qualité de fonctionnement;

d) que la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, Genève, 1971, a adopté la Recommandation N° Spa2 – 11 relative à la dispersion de l'énergie des porteuses dans les systèmes du service fixe par satellite,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les systèmes du service fixe par satellite devraient utiliser des techniques de dispersion de l'énergie de la porteuse, dans la mesure où cela est pratiquement possible et d'une manière compatible avec un fonctionnement satisfaisant des systèmes (voir le Rapport 384, § 2 et 3), afin d'obtenir un étalement de l'énergie tel que le brouillage causé aux stations d'un service de Terre fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences soit maintenu à tout moment dans les limites de tolérance spécifiées;

2. que tout système à satellites devrait être conçu de façon à permettre une dispersion de l'énergie de la porteuse jusqu'au maximum pratiquement possible (voir le Rapport 384), et qu'une telle dispersion soit applicable chaque fois qu'il est nécessaire de réduire les brouillages entre systèmes du service fixe par satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences.

RAPPORT 384-4

DISPERSION D'ÉNERGIE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2D/4)

(1966-1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

L'étude du partage des bandes de fréquences entre le service fixe par satellite et les systèmes de faisceaux hertziens et entre différents réseaux du service fixe par satellite montre clairement que, pour maintenir les brouillages mutuels entre les systèmes à un niveau tolérable, il sera indispensable, dans la plupart des cas, d'utiliser les techniques de dispersion d'énergie afin de réduire la densité d'énergie spectrale des émissions du service fixe par satellite pendant les périodes de faible charge. La réduction de la densité maximale d'énergie facilitera également:

- l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires en réduisant au minimum l'espacement orbital requis entre satellites utilisant la même bande de fréquences, et
- le fonctionnement à plusieurs porteuses des répondeurs à large bande.

L'importance de la dispersion d'énergie requise dépend évidemment, dans chaque cas particulier, des caractéristiques des systèmes, et cette question est dans l'esprit des études de partage de fréquences précisées aux Programmes d'études 2D/4 et 2J/4. Il est évidemment souhaitable, toutefois, que la densité d'énergie maximale dans des conditions de charge faible soit maintenue aussi voisine que possible de la valeur correspondant à l'heure chargée.

Dans le présent Rapport, on rend compte des résultats d'études théoriques et expérimentales sur les techniques de dispersion d'énergie applicables aux systèmes de radiocommunication par satellite utilisant respectivement la modulation de fréquence du type analogique et la modulation numérique.

La conclusion est que, dans la plupart des circonstances, on peut obtenir une dispersion substantielle de l'énergie. Il se peut cependant que l'efficacité de la dispersion soit sujette à certaines limitations, lesquelles sont mentionnées dans le Rapport.

2. Dispersion de l'énergie dans les systèmes analogiques à modulation de fréquence

2.1 *Système de téléphonie multivoie*

L'Annexe I étudie un certain nombre de méthodes destinées à maintenir un degré élevé de dispersion d'énergie de la porteuse dans les systèmes de téléphonie, en mettant l'accent plus spécialement sur la relation existant entre la dispersion obtenue et la complexité des méthodes de dispersion, et également sur l'accroissement résultant de la largeur de bande en fonction de la distorsion. Les méthodes se subdivisent en une ou plusieurs méthodes prises dans deux classes générales, l'une qui consiste à ajouter au signal d'entrée une onde de dispersion n'ayant pas nécessairement une amplitude constante; l'autre qui, en plus, commande efficacement la sensibilité de l'excursion de fréquence du modulateur de fréquence. Différentes combinaisons de ces deux méthodes sont discutées à l'Annexe I et illustrées par la Fig. 1.

La méthode 1a) est la plus simple: elle consiste à ajouter une onde de dispersion d'amplitude fixe. L'efficacité relative de cette méthode (c'est-à-dire le rapport entre la puissance maximale dispersée par 4 kHz et la puissance maximale par 4 kHz dans des conditions de pleine charge), qui utilise chacune des ondes d'un ensemble de quatre ondes de dispersion basse fréquence, est illustrée par la Fig. 2, où l'on admet un accroissement de 10% de la largeur de bande occupée en haute fréquence. Les quatre ondes sont considérées plus en détail dans l'Annexe I.

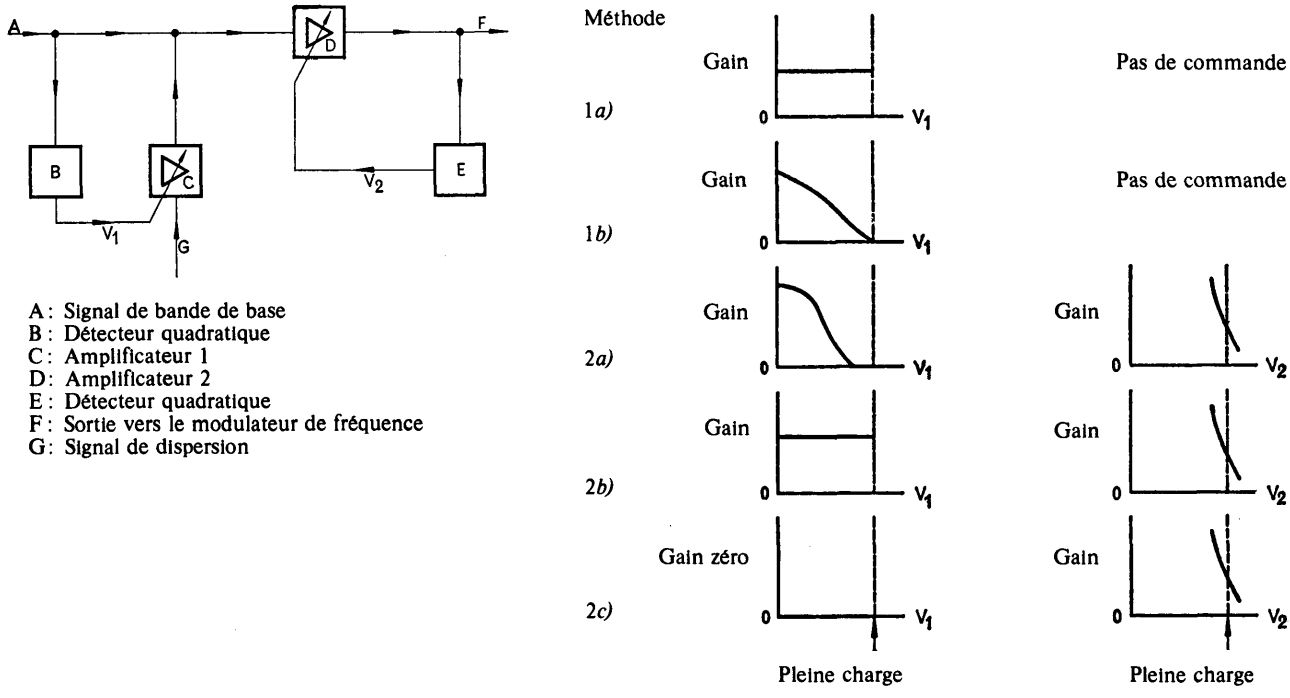


FIGURE 1 — *Schéma de principe*

(On n'a pas représenté les amplificateurs, filtres séparateurs, ni les pilotes de régulation de gain)

Il est évident, d'après la Fig. 2, que l'onde triangulaire à basse fréquence (courbe D) est la plus efficace de ces ondes, mais elle présente l'inconvénient de produire un brouillage de niveau plus élevé dans certains systèmes à une seule voie par porteuse en raison de la longueur du temps pendant lequel le signal brouilleur soumis à la dispersion demeure à l'intérieur de la bande passante du signal utile. (D'autres méthodes de dispersion qui causent moins de brouillage aux transmissions SCPC sont mentionnées au § 4.) Cela mis à part, la seule onde qui paraisse être susceptible d'une application générale est le bruit à basse fréquence (courbe C). L'avantage que présente la dispersion par le bruit à basse fréquence est que la bande de fréquences peut être facilement modifiée en vue de s'adapter à la gamme de fréquences de la sous-bande et que son efficacité ne dépend pas d'un type d'onde bien spécifié. On a toutefois constaté, dans la pratique, qu'il peut être difficile à produire et à utiliser.

En revanche, lorsqu'on est en présence d'une onde triangulaire, il faut veiller soigneusement à maintenir la linéarité de la forme d'onde, tout écart provoquant des variations de la densité spectrale et, par voie de conséquence, une détérioration de l'efficacité de la dispersion. Si l'on supprime les harmoniques d'ordre élevé de l'onde triangulaire au moyen d'un filtre, la non-linéarité se présentera sous la forme d'un aplatissement des crêtes qui diminuera aussi l'efficacité de la dispersion. Cependant, cette réduction sera moins grave s'il subsiste des ondes pilotes dans des conditions de faible charge. Au moment de décider s'il convient ou non d'employer un filtre dans tel ou tel cas particulier, il faudra donc mettre en balance des impératifs contradictoires, à savoir réduire le brouillage des voies de la bande de base à basse fréquence, d'une part, ou affaiblir l'efficacité de la dispersion, d'autre part.

Il serait utile d'étudier la possibilité d'employer, au lieu d'un bruit, un signal pseudo-aléatoire connu à spectre uniforme dans la bande des basses fréquences; ceci permettrait de supprimer ce signal à la réception et d'éviter ainsi certains inconvénients de cette méthode.

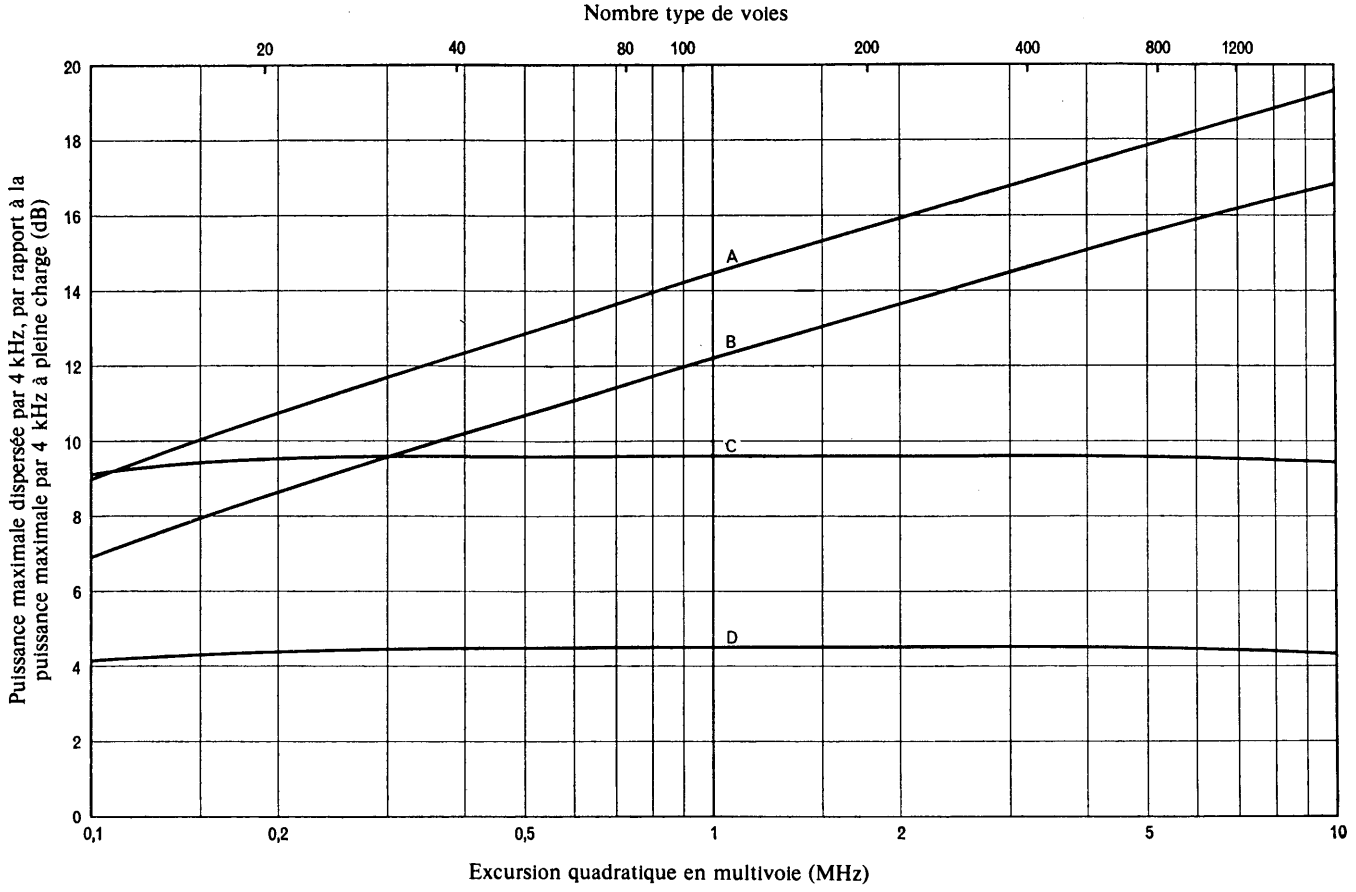


FIGURE 2

Si l'on en vient à considérer les méthodes d'application du signal de dispersion, on constate que l'utilisation de la méthode 1a) entraînerait un accroissement excessif de la largeur de bande occupée si l'on désirait se rapprocher des conditions de charge à l'heure de pointe. C'est pourquoi la méthode 1b), qui introduit en fonction de l'état de charge du système des moyens automatiques d'ajustement du degré de dispersion, offre une solution beaucoup plus intéressante.

La méthode 2 est plus compliquée que la méthode 1, mais elle permet de tirer profit de la nécessité de réaliser une dispersion d'énergie en améliorant les caractéristiques de bruit du système lorsque la sensibilité de l'excursion de fréquence est elle-même augmentée, dans des conditions de charge faible. L'inconvénient évident de cette méthode est la nécessité d'assurer une régulation globale du gain, alors que l'importance de l'avantage, procuré par des charges faibles, dépend de la charge en dehors des périodes chargées de la journée. Parmi les variantes de la méthode 2 étudiées dans l'Annexe I, la méthode 2a) semble être la mieux adaptée à une application généralisée.

Pour toute méthode qui requiert un brusque changement de l'importance de la dispersion supplémentaire en fonction de la variation de la charge, il faut choisir soigneusement l'intervalle de temps entre la variation de la charge et le moment où l'on procède à la commutation de la dispersion.

En étudiant l'importance de la dispersion qui peut être obtenue en pratique, on doit avoir présent à l'esprit que les conditions de pleine charge ne fournissent pas nécessairement le degré de dispersion que suppose la distribution de Gauss, comme il est dit au § 1 de l'Annexe I (voir le Rapport 792). Il ne serait pas raisonnable de supposer qu'en pratique cette condition idéale est remplie tant qu'on ne possède pas d'argument convaincant en faveur d'une telle hypothèse. Des mesures pratiques effectuées avec une charge de bruit blanc ont montré que les systèmes utilisant un signal de dispersion triangulaire peuvent maintenir la dispersion de l'énergie porteuse dans les limites de 2 dB lorsqu'on simule les conditions de charge à l'heure de pointe. On ne sait pas encore dans quelle mesure on se rapprochera de ces conditions dans la pratique, mais il semble peu judicieux de supposer que l'énergie sera dispersée à moins de 3 dB de la valeur correspondant aux conditions de charge de l'heure de pointe, sans augmenter la largeur de bande en haute fréquence.

2.2 *Systèmes de télévision*

A l'Annexe II, on étudie les problèmes généraux posés par les techniques de dispersion de l'énergie pour les systèmes de télévision et on donne les résultats d'une étude expérimentale pour la détermination des effets subjectifs de l'addition de diverses ondes à basse fréquence aux signaux de télévision à 625 lignes et à fréquences de trame de 50 Hz. Les résultats montrent qu'une onde triangulaire «symétrique» est préférable aux autres ondes étudiées et que l'effet subjectif résultant de l'introduction de cette onde (amplitude crête-à-crête égale à 50% au maximum de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo avant préaccentuation) est négligeable, pour autant que:

- l'onde de dispersion soit asservie à la fois en phase et en fréquence à la fréquence de trame;
- à la station de réception terrienne, on utilise des méthodes simples pour supprimer l'onde ajoutée;
- le système d'émission n'introduise pas d'intermodulation entre l'onde de dispersion et le signal vidéo.

Par onde triangulaire «symétrique», on entend une onde ayant la forme d'un triangle isocèle (c'est-à-dire des temps d'établissement et d'extinction égaux). On a étudié également (voir l'Annexe II) des ondes en dents de scie avec soit un temps d'établissement soit un temps d'extinction voisin de zéro.

Des études ont montré que lorsqu'un signal de télévision modulé par un signal de dispersion brouille des systèmes téléphoniques MRF multivoies (de Terre ou à satellites), la puissance spectrale à la sortie du détecteur prend un caractère à prédominance discrète. Les composantes spectrales du brouillage sont séparées les unes des autres par un intervalle égal à la fréquence de répétition du signal de dispersion. Si cette fréquence de répétition est inférieure à 4 kHz, les composantes du brouillage sont réparties entre toutes les voies téléphoniques qui, dans le spectre du groupe primaire, sont également séparées de 4 kHz. Si l'on augmente la fréquence du signal de dispersion jusqu'à la demi-fréquence de ligne ou la fréquence de ligne, les composantes du brouillage tombent dans une voie sur deux ou une voie sur quatre, et le niveau du brouillage dans les voies ainsi affectées atteint des valeurs allant jusqu'à 3 ou 6 dB respectivement. L'incidence de cette dégradation supplémentaire dépendra des paramètres du système en question.

Si l'on ne tient compte que des aspects télévision du problème, il n'y a pratiquement pas à choisir entre les signaux «symétriques» en dents de scie de 12,5 et de 25 Hz. L'utilisation du second n'apporte qu'un faible avantage en ce qui concerne les équipements, et on estime par conséquent que, pour la dispersion d'énergie des signaux de télévision à 625 lignes et à fréquence de trame de 50 Hz, une onde triangulaire «symétrique» à 25 Hz synchronisée doit être utilisée; on ne s'attend pas que des résultats nettement différents soient obtenus par l'utilisation d'une onde triangulaire «symétrique» à 30 Hz synchronisée pour les systèmes de télévision à fréquence de trame de 60 Hz.

Pour déterminer l'effet de dispersion produit par cette méthode, on supposera, à titre d'exemple, que les caractéristiques d'ensemble du système réduisent l'amplitude crête-à-crête permise de l'onde de dispersion à 30% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo. S'agissant d'un système à 625 lignes utilisant le réseau normal de préaccentuation (Avis 405), l'excursion de fréquence crête-à-crête de l'onde de dispersion sera égale à 9,4% de l'excursion de fréquence crête-à-crête du signal vidéo sans préaccentuation. Appelant ΔF en MHz l'excursion crête-à-crête du signal vidéo, la dispersion obtenue est environ:

$$10 \log \left(\frac{\text{énergie maximale par 4 kHz}}{\text{énergie totale}} \right) = 10 \log \frac{0{,}004}{0{,}094\ \Delta F} = -(14 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

A titre de comparaison, la dispersion théorique obtenue dans le cas de la téléphonie est donnée par l'expression ci-après, en supposant que la distribution spectrale est gaussienne et que le rapport de la valeur de crête à la valeur quadratique moyenne est égal à 12 dB (voir l'Annexe I):

$$-\left(28 + 10 \log \frac{\Delta F}{8}\right) = -(19 + 10 \log \Delta F) \quad \text{dB}$$

ce qui signifie que le cas de la télévision ne se trouve vraisemblablement qu'à quelque 5 dB au-dessous de l'optimum, pour une augmentation de quelque 10% de la largeur de bande haute fréquence.

En vue de réduire la largeur de bande, il serait souhaitable de pouvoir commander l'excursion de fréquence suivant la méthode 1b) de l'Annexe I. Il n'est pas évident qu'il soit possible d'employer une méthode simple, car il serait probablement nécessaire de contrôler la concentration de l'énergie dans le spectre haute fréquence.

En plus des méthodes de dispersion d'énergie spécifiées plus haut, deux autres systèmes sont décrits aux § 5 et 6 de l'Annexe II. Le premier est un système de dispersion par transformation vidéo; le second met en œuvre des techniques de dispersion utilisées pour améliorer la protection fournie aux transmissions téléphoniques SCPC, pour lesquelles la fréquence du signal dispersé est égale à la fréquence de ligne de la télévision.

Enfin, il faut noter que l'utilisation de l'une quelconque des méthodes précitées pour la dispersion de l'énergie exigerait, pour la transmission de télévision en couleur, un degré de linéarité des systèmes plus élevé même que celui requis pour la transmission de télévision monochrome.

3. Dispersion de l'énergie dans les systèmes à modulation numérique

L'Annexe III contient une étude sur la nécessité d'appliquer une dispersion de l'énergie dans des systèmes à modulation numérique; on y trouve la description de deux méthodes de conversion de code dans la bande de base, grâce auxquelles le spectre radioélectrique transmis est maintenu dans un état voisin de l'état idéal que l'on obtiendrait si le train de bits d'information était totalement aléatoire.

Selon toute probabilité, on sera obligé dans de nombreux cas d'appliquer la dispersion du spectre des émissions du service fixe par satellite. L'utilisation d'une séquence pseudo-aléatoire dans l'émetteur, pour rendre l'information numérique aléatoire, puis sa suppression dans le récepteur constituent une méthode simple pour obtenir un haut degré de dispersion.

Il ne sera pas nécessaire en général d'appliquer le signal de dispersion au préambule transmis par un système AMRT puisque la densité spectrale due à cette partie de l'émission est le plus souvent comparable à celle qui est obtenue avec une dispersion idéale, en tout cas pour les débits binaires au moins égaux à quelques dizaines de mégabits/seconde.

La longueur de la séquence pseudo-aléatoire choisie dépend du degré de dispersion requis. Toutefois, il sera généralement utile d'utiliser une séquence plus longue que la durée d'une trame dans les systèmes à un seul accès, ou plus longues que la durée du paquet dans les systèmes AMRT. Dans de nombreux cas, on pourra même se contenter de séquences plus courtes.

4. Conclusions

Il apparaît que les méthodes les plus prometteuses pour la dispersion de l'énergie sont les suivantes:

- pour les systèmes de téléphonie à modulation de fréquence: l'addition d'un signal ajusté en fonction de la charge, au-dessous de la bande de base, comme il est décrit dans la méthode 1b) de la Fig. 1. Le signal ajusté peut être du bruit ou bien une onde triangulaire «symétrique», mais, dans la pratique, il est généralement plus facile d'utiliser cette dernière;
- pour les systèmes de télévision à modulation de fréquence: l'addition d'une onde triangulaire «symétrique» synchronisée sur la fréquence de l'image, comme il est décrit dans la méthode 1a) de la Fig. 1;
- pour les systèmes à modulation numérique: la conversion de code, dans laquelle le train de bits du message est multiplié par un train d'impulsions pseudo-aléatoire, selon des méthodes similaires à celles qui sont décrites dans l'Annexe III.

Des ondes de dispersion de forme triangulaire sont couramment appliquées aux porteuses modulées en fréquence dans la plupart des réseaux du service fixe par satellite. L'avantage théorique des signaux de dispersion triangulaires ne se retrouve dans la pratique que dans la mesure où le signal utilisé est linéaire. L'utilisation de ces méthodes pourrait procurer une dispersion de l'énergie aussi grande que celle qui est obtenue dans les conditions de pleine charge. Mais le dépassement de la puissance de dispersion par bande de 4 kHz, par rapport à la puissance qui peut être obtenue dans les conditions de pleine charge (en supposant un spectre gaussien) n'est vraisemblablement pas, en pratique, inférieur à 3 dB dans le cas de la téléphonie et à 5 dB dans le cas de la télévision. Avec une dispersion d'énergie de ce niveau, son adjonction à la largeur de bande à hautes fréquences occupée n'a présenté aucune difficulté.

La dispersion d'énergie couramment obtenue au moyen d'ondes de dispersion de forme triangulaire se révèle satisfaisante en pratique, sauf lorsque le signal utile est celui d'un système à une seule voie par porteuse. Avec l'utilisation d'une onde de dispersion de forme triangulaire à basse fréquence ($\geqslant$ 1 kHz) dans des systèmes multivoies, un signal utile d'un système à une seule voie par porteuse peut être brouillé pendant de courtes périodes par la quasi-pleine puissance d'une porteuse brouilleuse. Cette difficulté peut être surmontée dans les systèmes de télévision à modulation de fréquence en utilisant pour la dispersion une transformation du signal vidéo ou un signal triangulaire dont la fréquence est égale à la fréquence de ligne de la télévision.

ANNEXE I

MÉTHODES DE DISPERSION DE L'ÉNERGIE A UTILISER AVEC DES SIGNAUX DE TÉLÉPHONIE ANALOGIQUES A MODULATION DE FRÉQUENCE

1. Généralités

Lorsqu'on étudie les méthodes permettant d'obtenir un haut degré de dispersion de l'énergie porteuse, il est utile de savoir quel est l'effet de dispersion de la bande de base pleinement chargée, afin d'avoir une valeur de référence avec laquelle comparer ce qui peut être obtenu artificiellement. Pour la catégorie générale des systèmes à modulation de fréquence à grande excursion que nous considérons (c'est-à-dire ceux pour lesquels la valeur quadratique moyenne de l'excursion (δF) en multivoie dépasse la fréquence la plus élevée de la bande de base), il est légitime d'admettre que le spectre à puissance moyenne, dans les conditions conventionnelles de charge à l'heure chargée, a une forme gaussienne. Donc, l'effet de dispersion obtenu dans ces conditions est:

$$10 \log \left(\frac{\text{énergie maximale par 4 kHz}}{\text{énergie totale}} \right) = 10 \log \frac{0{,}004}{\sqrt{2\pi}\,\delta F} = -(28 + 10 \log \delta F) \quad \text{dB}$$

(où δF est exprimée en MHz)

En utilisant les renseignements figurant dans le Rapport 792, on peut calculer l'effet de dispersion dans le cas où δF est inférieur à la plus élevée des fréquences de la bande de base.

La Fig. 1 montre, sous la forme de diagrammes, les dispositions qu'il est possible de prendre afin de maintenir un degré élevé de dispersion de l'énergie porteuse dans des conditions de charge réduite, en appliquant les méthodes examinées dans la présente Annexe.

2. Dispersion par addition de signaux

2.1 *Méthode 1a)*

La méthode la plus simple pour introduire un certain degré de dispersion de l'énergie porteuse est d'ajouter au signal de bande de base une onde convenable de dispersion à basse fréquence, d'amplitude fixe, comme l'indique la méthode 1a) de la Fig. 1. Parmi les différentes ondes de dispersion qui ont été proposées, les suivantes font l'objet d'un examen dans le présent document:

- un signal sinusoïdal (courbe A de la Fig. 2);
- un signal sinusoïdal auquel sont ajoutés, avec une phase convenable, 30% de l'harmonique 3 (courbe B de la Fig. 2);
- une bande de bruit à basse fréquence (courbe C de la Fig. 2);
- une onde triangulaire à basse fréquence (courbe D de la Fig. 2).

Afin de fournir une base de comparaison entre les rendements de ces différentes ondes, on a calculé la densité spectrale d'énergie maximale qu'elles produisent lorsqu'elles sont appliquées à une porteuse non modulée, en admettant une augmentation de 10% de la largeur de bande occupée en haute fréquence. Les résultats sont portés sur la Fig. 2, qui montre ce qui se produirait dans les conditions de charge de l'heure chargée; les courbes de la Fig. 2 ont été désignées de A à D comme indiqué ci-dessus. Il se présente ici une certaine approximation par suite de la question difficile que pose la relation entre la distorsion du signal et la limitation de la largeur de bande en haute fréquence; on l'a évitée en admettant:

- que, partout, l'occupation de la largeur de bande suit la loi de Carson (avec un rapport valeur de crête/valeur quadratique moyenne égal à 12 dB);
- que cette formule relative à la largeur de bande peut également être appliquée à la somme de la valeur du signal et de la valeur quadratique moyenne des excursions de fréquence due à la dispersion, lorsque celle-ci est assurée par une bande de bruit;
- dans les autres cas, que la largeur de bande occupée en haute fréquence est augmentée par l'excursion crête-à-crête de l'onde de dispersion.

On ne pense pas que les erreurs ainsi introduites soient importantes; en tout cas, elles doivent se produire dans le même sens pour les différents types d'ondes. Comme approximation complémentaire, chaque type d'onde de dispersion est représenté à la Fig. 2 par une seule courbe. La relation entre les capacités types (en nombre de voies) et les excursions de fréquence, qui figurent sur les deux échelles d'abscisses, est fondée sur les renseignements donnés dans l'Annexe au Rapport 708.

2.1.1 *Dispersion sinusoïdale*

Il est évident, d'après la courbe A de la Fig. 2, que la dispersion d'énergie porteuse produite par un signal sinusoïdal est assez inefficace, tandis que la courbe B montre qu'un signal sinusoïdal, auquel sont ajoutés 30% d'harmonique 3, ne procure qu'une amélioration de 2 dB. Pour la transmission de type classique de 20 voies, la densité maximale de puissance, dans les deux cas, dépasse d'environ 10 dB la valeur constatée dans des conditions de pleine charge. C'est là un trait caractéristique de ces deux types de dispersion que la quantité, dont la densité de puissance dispersée dépasse la densité à pleine charge, croît avec la valeur quadratique moyenne de l'excursion de fréquence en multivoie et, par conséquent, avec la capacité en voies. Par exemple, pour 1200 voies, le dépassement est d'environ 18 dB.

2.1.2 *Dispersion triangulaire*

Pour un accroissement donné de la largeur de bande occupée, la méthode la plus efficace pour assurer la dispersion de l'énergie d'une seule raie spectrale est, au moins théoriquement, d'appliquer un signal triangulaire. La densité de puissance dispersée est inversement proportionnelle au pourcentage d'accroissement admissible pour la largeur de bande haute fréquence; la courbe D de la Fig. 2 montre que, si l'on autorise un accroissement de 10% de la largeur de bande occupée, la puissance dispersée par 4 kHz dépasse d'environ 4,5 dB la puissance correspondant aux conditions de pleine charge, cela pour la plupart des voies.

Avec l'utilisation d'une onde de dispersion de forme triangulaire à basse fréquence ($\leqslant$ 1 kHz) dans des systèmes multivoies, un signal utile d'un système à une seule voie par porteuse peut être brouillé pendant des périodes significatives par la quasi-pleine puissance d'une porteuse brouilleuse.

Le signal triangulaire offre évidemment un moyen simple et efficace de dispersion de l'énergie présente dans les raies spectrales isolées des transmissions téléphoniques. On doit se rappeler, toutefois, que son efficacité dépend de la fidélité de conservation de la forme de l'onde jusqu'à ce qu'il apparaisse comme une modulation de fréquence, notamment si un degré élevé de dispersion est requis. Si 32 dB de dispersion étaient requis pour une transmission à 1200 voies par exemple, un aplatissement de 0,25% seulement des extrémités de l'onde pourrait conduire à doubler localement la densité de l'énergie spectrale.

Dans certains cas, il faut filtrer le signal triangulaire avant son application, pour éviter que les harmoniques du fondamental ne perturbent les voies basses du multiplex téléphonique. Pour des fréquences de l'onde triangulaire inférieures ou égales à 150 Hz, et pour une fréquence basse de la bande de base multivoie égale à 4 kHz, le filtrage entraîne une déformation des points anguleux du signal et, en conséquence, des pointes de densité d'énergie aux extrémités du spectre de modulation en cas de faible charge.

Le Tableau I ci-après donne des valeurs mesurées de l'augmentation de la densité d'énergie aux extrémités du spectre par rapport à la densité à la fréquence centrale du spectre pour un multiplex à 132 voies, en fonction de la fréquence de l'onde triangulaire. Ce système utilisait une régulation discontinue à un seul échelon.

TABLEAU I

Fréquence de l'onde triangulaire (Hz)	Augmentation de la densité d'énergie (dB)
20	3
80	5
150	7

Le filtre passe-bas utilisé était un filtre du type Tchebychev à sept pôles, de fréquence de coupure 2,7 kHz et dont l'affaiblissement à 4 kHz était égal à 34 dB.

On peut par contre tenir compte de la présence, à l'entrée du modulateur, de l'onde pilote de continuité, à condition qu'elle soit produite indépendamment du multiplex téléphonique. Dans les mêmes conditions de mesure que celles indiquées plus haut, l'application d'un pilote au niveau de -20 dBm0 permet de ramener l'augmentation des crêtes de densité d'énergie aux extrémités de bande de 7 à 3 dB.

2.1.3 *Dispersion par une bande de bruit à basse fréquence*

Une forme de dispersion de l'énergie porteuse qui n'est pas critique dans ses applications et qui partage avec la dispersion triangulaire la propriété de produire une densité spectrale d'énergie maximale inversement proportionnelle à l'amplitude du signal consiste à ajouter à la bande de base multivoie une bande de bruit à basse fréquence. La courbe C de la Fig. 2 montre que, pour un accroissement de 10% de la largeur de bande occupée, la puissance maximale dispersée par 4 kHz dépasse la puissance, aux conditions de pleine charge, d'environ 9,5 dB, quel que soit le nombre des voies.

Note. – Lorsque le niveau du signal de dispersion n'est pas fixe, on peut obtenir le degré de dispersion requis en appliquant les méthodes indiquées dans [CCIR, 1970-74].

2.2 *Méthode 1b)*

Une variante évidente de la méthode 1a) consisterait à introduire des dispositifs d'ajustement automatique du degré de dispersion artificielle d'énergie en fonction de la charge du système, comme le montre la méthode 1b) de la Fig. 1. Il serait, en fait, possible, de cette façon, en utilisant par exemple la dispersion par bande de bruit, de maintenir la densité spectrale énergétique maximale d'une transmission à une valeur extrêmement voisine de sa valeur à la pleine charge sans aucun accroissement de la largeur de bande occupée. Les caractéristiques qui pourraient être obtenues en pratique dépendraient de la distorsion produite par l'interaction (du fait de la limitation de la largeur de bande et du fait des autres caractéristiques de transmission) entre le signal de dispersion, les signaux basse fréquence isolés et les voies téléphoniques actives dans les conditions de charge faible. Il est probable que ceci ne peut être fixé qu'expérimentalement car, jusqu'ici, aucune méthode n'a été généralement acceptée pour calculer la distorsion subie par les signaux modulés en fréquence au cours de la transmission, même dans le cas simple d'une charge de bruit blanc.

Une méthode particulière pour introduire les différents degrés de dispersion qui font l'objet du présent paragraphe consiste à introduire de la parole artificielle (c'est-à-dire du bruit à largeur de bande limitée) dans une proportion convenable des voies téléphoniques inoccupées. Bien qu'une dispersion complète puisse de cette façon être maintenue sans accroissement de la largeur de bande, la complexité des appareils que doit vraisemblablement exiger cette méthode présente un inconvénient sérieux, ainsi que la nécessité probable de l'appliquer aux pupitres d'où provient la bande de base.

3. Dispersion par commande automatique de l'excursion de fréquence

3.1 *Généralités*

Il est clair qu'il serait possible de régler le niveau du signal qui entre dans le modulateur de fréquence de façon à maintenir la valeur quadratique moyenne (ou la crête) de l'excursion de fréquence à une certaine valeur constante. Quel que puisse être le contenu de la bande de base, on pourrait obtenir simplement le niveau désiré en amplifiant suffisamment ou en amplifiant après addition d'une quantité fixe ou variable de dispersion artificielle. L'affaiblissement global de transmission de la bande de base du système serait maintenu sensiblement constant par compensation du gain après démodulation, par l'intermédiaire d'une fréquence pure provenant d'un pilote. Les possibilités sont discutées dans les paragraphes suivants.

3.2 *Méthode 2a)*

La méthode la plus générale permettant d'obtenir une dispersion de l'énergie porteuse, étudiée dans ce Rapport et dont les autres méthodes ne sont en quelque sorte que des formes dérivées, est la méthode 2a) de la Fig. 1. Elle consiste à superposer à la bande de base, avant l'intervention de la commande automatique de l'excursion de fréquence, une source de dispersion artificielle de l'énergie dont l'amplitude est fonction des conditions de charge. L'utilisation de cette méthode ne modifie pas, ou augmente très peu, la largeur de bande occupée en haute fréquence. De plus, si l'introduction de la dispersion artificielle était retardée jusqu'à l'approche des conditions de charge faible, il pourrait en résulter une diminution appréciable de la sensibilité du système aux bruits thermiques, à la distorsion et aux brouillages. L'amplitude de cette diminution de sensibilité dépendrait du pourcentage de la puissance de bande de base à pleine charge, attribuée aux signaux de parole. Comme dans le cas de la méthode 1b), il est souhaitable de procéder à une certaine détermination de la distorsion de la bande de base résultant de l'application de cette méthode; cependant, toutes choses égales par ailleurs, cette distorsion serait plus faible que dans la première méthode, étant donné que l'accroissement de l'excursion de fréquence par voie à charge faible rendrait le système moins sensible aux composantes de distorsion produites en haute fréquence.

En ce qui concerne le choix d'un moyen de dispersion artificielle à ajouter à la bande de base, celui-ci pourrait consister en l'un des signaux de dispersion à basse fréquence considérés au § 2. Le signal à bande de bruit, ressemblant à une ou plusieurs voies téléphoniques en activité ininterrompue, est peut être préférable car il est modérément efficace et produit le même effet de dispersion, pour une valeur donnée de l'excursion de fréquence efficace, que le signal de la bande de base; il permet une commande exacte de l'excursion de fréquence par un simple détecteur quadratique et ne présente aucune difficulté d'application aux amplitudes élevées.

3.3 *Méthode 2b)*

On peut, à titre de simplification mineure de la méthode précédente, maintenir à une valeur fixe l'amplitude du signal de dispersion ajouté. Il en résulterait un accroissement de la largeur de bande occupée en haute fréquence, moins important toutefois que dans la méthode 1a), pour le même degré de dispersion.

3.4 *Méthode 2c)*

L'absence complète d'un signal de dispersion artificielle dans le signal modulant réduirait la dispersion par commande automatique de l'excursion de fréquence à sa forme la plus simple. L'efficacité de la méthode semblerait dépendre du degré modéré de complexité que comporte le spectre de la bande de base même à charge faible. Malheureusement, il n'est pas possible de compter sur cela: en l'absence complète de toute activité de la voie téléphonique, la charge du système dégénérerait en un certain nombre de fréquences pilotes, résidus de porteuses et autres éléments de cette nature. Il peut exister suffisamment de signaux comme ceux-ci dans un système à grande capacité pour produire dans la bande de base quelque semblant de puissance uniformément répartie, mais ceci ne semble plus devoir être vrai pour les systèmes à faible capacité. Dans de tels systèmes, notamment si beaucoup des résidus de porteuses se trouvent à un niveau exceptionnellement bas, les niveaux de charge les plus bas peuvent provenir d'un très petit nombre de pilotes prédominants.

On peut montrer que, si la charge d'un système ne résulte que d'une ou deux fréquences prédominantes dans la bande de base, les densités spectrales en haute fréquence peuvent dépasser d'un grand nombre de décibels celles obtenues à pleine charge. Il ne serait donc pas raisonnable de compter sur la présence de quelques fréquences pour obtenir, par le seul moyen de la commande automatique de l'excursion de fréquence, un degré de dispersion d'énergie analogue à celui qui résulte de la pleine charge.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR
[1970-74]: 4/273 (U.R.S.S.).

ANNEXE II

MÉTHODES DE DISPERSION DE L'ÉNERGIE A UTILISER AVEC DES SIGNAUX DE TÉLÉVISION ANALOGIQUES A MODULATION DE FRÉQUENCE

1. Introduction

Dans un système de transmission de télévision utilisant la modulation de fréquence, une proportion importante de la puissance rayonnée peut, dans certaines conditions de modulation, être concentrée sur, ou au voisinage de, la fréquence porteuse: par exemple, lorsqu'on transmet une image de télévision comportant de grandes surfaces de même brillance. On peut obtenir une dispersion de l'énergie en ajoutant au signal vidéo, avant modulation, un signal convenable à basse fréquence.

Pour obtenir des renseignements sur la dégradation qui résulterait de l'utilisation de cette technique de dispersion de l'énergie, on a procédé à une étude expérimentale ayant pour but de déterminer les effets subjectifs que l'on obtient, avec des signaux de télévision monochrome à 625 lignes, lorsque l'on ajoute et que l'on supprime, par diverses méthodes, un certain nombre de signaux basse fréquence différents, utilisables aux fins de dispersion de l'énergie.

2. Signal de dispersion

L'amplitude et la forme du signal de dispersion qui est ajouté au signal vidéo avant modulation doivent produire le degré requis de dispersion de la puissance porteuse, sans apporter de dégradation appréciable aux caractéristiques de transmission du système. Cette dernière condition dépend également, d'une part de l'efficacité de la méthode utilisée pour supprimer le signal ajouté, d'autre part de la linéarité globale du système de transmission. Afin de déterminer le signal préféré, on a étudié de façon assez détaillée deux types de signaux triangulaires (le signal triangulaire «symétrique» et le signal «en dents de scie») ayant des fréquences de récurrence centrées au voisinage de 50, 25 et 12,5 Hz.

On a pensé obtenir le résultat optimal en synchronisant le signal de dispersion sur la fréquence de trame du signal de télévision; on a également pensé que la mise en phase relative des signaux synchronisés pourrait, dans certains cas, introduire des variations dans la dégradation de l'image. On a examiné ces influences en utilisant à la fois des signaux de dispersion synchronisés et non synchronisés et, en ce qui concerne la dégradation de l'image reçue, les essais ont montré qu'il y a un avantage considérable à utiliser des signaux de dispersion synchronisés plutôt que des signaux non synchronisés. Comme la production de signaux synchronisés sur la fréquence de trame de télévision ne présente pas de problèmes pratiques, les autres essais furent limités à des signaux synchronisés.

Le procédé de synchronisation doit normalement assurer une mise en phase correcte du signal avec le signal de trame de télévision. Avec les signaux en dents de scie à 50, 25 et 12,5 Hz et les signaux symétriques à 25 et 12,5 Hz, tous les points d'inflexion se présentent pendant l'intervalle de suppression trame, et les discontinuités dans la pente du signal ne se traduisent pas par une dégradation de l'image. Avec le signal symétrique à 50 Hz, seuls des points d'inflexion alternés peuvent coïncider avec l'intervalle de suppression trame, et les autres points se présentent au point milieu de chaque trame (c'est-à-dire au milieu de l'image).

Il est apparu vraisemblable que le niveau crête-à-crête du signal de dispersion requis pour la dispersion de l'énergie était situé entre 10 et 50% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo avant préaccentuation, et les essais ont été limités à cette gamme de niveaux.

Koumych [1970], Chavdia et Ignatkine [1974] ont décrit une méthode qui permet d'élever le niveau de dispersion sans augmenter en même temps l'excursion de fréquence de crête. Dans cette méthode, on propose que les crêtes qui se forment sur les flancs de l'impulsion vidéo sous l'effet du réseau de préaccentuation normal soient soumises à un processus non linéaire avant la modulation. Ce processus a pour effet de réduire l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo, ce qui permet d'accroître la dispersion à l'intérieur de la largeur de bande nominale du système.

Un autre facteur dont il faut tenir compte dans la réalisation des systèmes de dispersion d'énergie est la présence probable d'une dispersion «naturelle» due à des imperfections des éléments du système. Par exemple, les systèmes avec élévateurs de fréquence peuvent introduire un niveau non négligeable de dispersion en raison de la «gigue» qui se produit dans les oscillateurs. Il faut poursuivre l'étude pour déterminer de quelle manière la dispersion «naturelle» pourrait contribuer à la coordination, sans provoquer, en même temps, une diminution inacceptable de la qualité de fonctionnement du système subissant la dispersion.

3. Linéarité de la voie de transmission

Lorsque la voie de transmission présente des non-linéarités, il peut se produire des phénomènes d'intermodulation entre le signal de dispersion et le signal vidéo. Dans ce cas, des défauts gênants peuvent apparaître dans l'image de télévision et particulièrement dans l'image en couleur. A titre d'exemple, des essais effectués avec le système PAL et un signal de dispersion triangulaire symétrique à 50 Hz (synchronisé sur le balayage de trame) et d'environ 0,5 V crête-à-crête, mesuré avant préaccentuation en un point où le signal vidéo est au niveau nominal de référence (voir l'Avis 270), ont montré que l'image possédait un indice de qualité subjective égal à 3 dans l'échelle de dégradation à six notes (Note 2 du Rapport 405) dans les conditions suivantes:

- phase différentielle . . . . . 8°
- gain différentiel 10%
- non-linéarité à court terme . . . . . 10%.

Il paraît souhaitable de poursuivre les études à ce sujet afin de déterminer la limite acceptable des non-linéarités pour les divers systèmes de télévision, dans une liaison de télévision par satellite utilisant la dispersion d'énergie.

4. Suppression du signal de dispersion

A la station de réception terrienne, le signal de dispersion doit être éliminé du signal de bande de base; les deux méthodes ci-après ont été proposées:

4.1 *Annulation du signal de dispersion*

Le signal de dispersion peut être éliminé du signal de bande de base par «annulation» à l'aide d'un signal de dispersion en opposition de phase produit localement. Il peut être utile de transmettre le signal de dispersion dans une voie subsidiaire et d'avoir ainsi un autre moyen pour reproduire le signal localement.

Deux méthodes d'annulation sont possibles. Dans la première, le signal de dispersion peut être ajouté en opposition de phase, après démodulation. Dans la seconde, l'oscillateur local du récepteur de la station terrienne est modulé en fréquence par le signal de dispersion en opposition de phase. L'avantage de cette méthode est le suivant: étant donné que la dispersion d'énergie est annulée avant la démodulation du signal FM, il n'est pas nécessaire d'augmenter la largeur de bande en fréquence intermédiaire du discriminateur. Des expériences effectuées récemment ont montré que l'annulation du signal suivie d'une «fixation» (comme il est décrit dans le § 4.2) constitue une méthode efficace, qui supprime le signal de dispersion plus complètement qu'une ou deux «fixations» seulement.

4.2 *Fixation du niveau du noir*

Les effets du signal de dispersion sur le signal de bande de base peuvent être supprimés par l'utilisation d'une technique bien connue en télévision sous le nom de «fixation du niveau du noir». Le dispositif mis en œuvre à cette fin est normalement utilisé pour supprimer la distorsion basse fréquence d'un signal de télévision, par échantillonnage et correction d'erreur [Savage, 1962; Doba et Rieke, 1950].

La quantité dont peut être réduit un signal d'erreur à basse fréquence au moyen de la «fixation du niveau du noir» est fonction de la fréquence du signal d'erreur et du niveau du bruit aléatoire présent dans le signal vidéo. Comme les premiers systèmes à satellites pourront être amenés à transmettre des signaux vidéo ayant un rapport signal/bruit médiocre. les caractéristiques des dispositifs de «fixation du niveau du noir» utilisés dans ces essais ont été ajustées de façon à être cohérentes avec les caractéristiques optimales que l'on peut obtenir avec des systèmes à 625 lignes fonctionnant dans des conditions de rapport signal/bruit médiocre. Le Tableau II donne des caractéristiques typiques pour les signaux d'erreur sinusoïdaux.

TABLEAU II

Fréquence du signal d'erreur (Hz) (onde sinusoïdale)	50	25	12,5
$\frac{\text{Niveau de sortie crête-à-crête du signal d'erreur}}{\text{Niveau d'entrée crête-à-crête du signal d'erreur}}$ (dB)	−15	−21	−27

(On doit noter que, lorsque la fréquence du signal d'erreur décroît, l'efficacité de la fixation du niveau du noir et la visibilité du scintillement sur l'image croissent toutes deux; du point de vue de la dégradation subjective, ces deux effets ont donc tendance à s'annuler.)

L'application de la «fixation du niveau du noir» à un signal d'erreur ayant une forme triangulaire produit un résultat analogue à celui qu'on obtiendrait si le signal d'erreur était différencié et, avec les niveaux qui peuvent être nécessaires dans un système réel de dispersion d'énergie, un seul dispositif de «fixation du niveau du noir», du type décrit, ne suffit pas pour réduire à un niveau acceptable les défauts introduits par l'un quelconque des signaux considérés.

A ce stade, il faut mentionner une différence capitale entre les signaux «en dents de scie» et les signaux «symétriques». Etant donné que la pente du signal «en dents de scie» est constante durant la partie «active» de chaque trame, le seul défaut qui puisse être observé sur un récepteur de contrôle, après que le signal vidéo a subi la fixation du niveau du noir, est une ombre légère et probablement insignifiante à travers l'image. Cependant, la pente très grande du signal de dispersion durant l'intervalle de suppression trame produit, pendant cette période, une distorsion sérieuse du signal de dispersion, dont l'amplitude dépend du niveau du signal de dispersion utilisé. En pratique, cette distorsion est des plus indésirables car elle peut interférer à la fois avec les signaux de synchronisation et les signaux d'essai d'intervalle vertical qui se produisent pendant l'intervalle de suppression trame. Il est également très difficile de supprimer ce type de distorsion lorsqu'il a été introduit dans le signal vidéo.

Avec le signal «symétrique», le défaut résiduel qui reste après une seule «fixation du niveau du noir» peut être observé comme un défaut d'image. Avec un signal à 50 Hz, le défaut apparaît comme une perturbation au milieu de l'image. Pour les signaux à 25 et 12,5 Hz, on observe un scintillement. Cet effet dépend également du niveau du signal de dispersion utilisé, mais, si l'on répète une nouvelle fois l'opération de «fixation du niveau du noir», on réduit le scintillement à un niveau imperceptible, même avec un signal de dispersion ayant une amplitude égale à 50% de l'amplitude crête-à-crête du signal vidéo.

Bien que les caractéristiques de la distorsion du signal après deux «fixations» soient quelque peu différentes, l'amplitude de la distorsion résiduelle, lorsqu'on utilise un signal de dispersion symétrique, est d'environ 10 à 20 dB inférieure à ce qu'elle est lorsqu'on utilise un signal «en dents de scie».

4.3 *Contre-réaction de fréquence*

Il est possible de supprimer le signal de dispersion en appliquant une contre-réaction de fréquence à bande étroite, dans l'étage FI du récepteur. L'avantage de cette méthode est de permettre une diminution de la largeur de bande effective du récepteur, ce qui améliore le seuil de bruit de cet appareil.

Dans une application particulière de ce principe, on a choisi un signal de dispersion de 2,5 Hz. Dans le récepteur, le signal de dispersion est supprimé par un circuit de contre-réaction négative qui contient un filtre basse fréquence dont la fréquence de coupure est inférieure à la fréquence la plus basse du signal vidéo. De ce fait, l'excursion de fréquence provoquée par le signal de dispersion diminue d'une valeur qui dépend du degré de contre-réaction appliqué; il est facile d'obtenir une réduction de 15 dB. L'amplitude du signal vidéo n'est pas affectée.

5. Dispersion par transformation du signal vidéo

Avec une modulation angulaire du signal de télévision, la dispersion de l'énergie porteuse peut être effectuée en inversant la polarité du signal vidéo ligne par ligne et en remplaçant les impulsions de synchronisation de ligne et de trame par des paquets d'oscillations sinusoïdales. La période de chaque paquet est égale à celle de l'impulsion de synchronisation correspondante et l'amplitude crête-à-crête des oscillation sinusoïdales est égale à celle du signal vidéo.

Les résultats des essais effectués en appliquant la méthode de la dispersion de la porteuse figurent dans [Mustafidi et Finogeev, 1976].

6. Signal de dispersion d'énergie à la fréquence de ligne

Le signal classique de dispersion d'énergie en télévision est un signal triangulaire dont la fréquence est égale à la moitié de la fréquence de trame; il ne procure aucune protection aux émissions comportant une seule voie par porteuse (SCPC). La raison en est que, avec le taux de balayage de fréquence qui en résulte, soit environ 1 MHz par 1/50 s, le temps passé par la porteuse de télévision à l'intérieur de la bande passante de réception SCPC est beaucoup plus long que le temps de réponse du filtre FI du récepteur. En conséquence, le démodulateur du récepteur SCPC est périodiquement brouillé par la puissance totale de la porteuse de télévision.

Selon des études faites aux Etats-Unis d'Amérique [Yam, 1980], il est possible d'utiliser la dispersion d'énergie à la fréquence de ligne de télévision pour réduire d'environ 9 dB la marge de protection nécessaire des émissions SCPC contre les porteuses MF de télévision, en comparaison avec la dispersion à la fréquence moitié de la fréquence de trame. Il y a lieu, toutefois, de poursuivre les études avant d'envisager une application de ces techniques aux liaisons de connexion des satellites de radiodiffusion et des systèmes nationaux et régionaux, compte tenu de la complexité qui en résulterait pour les récepteurs.

Si on utilise un signal de dispersion à la fréquence de ligne, le niveau du brouillage causé à des circuits téléphoniques multivoies par satellite et à des circuits de faisceaux hertziens de Terre est jusqu'à 6 dB supérieur au brouillage qui serait causé par un signal de dispersion basse fréquence (fréquence de trame ou fréquence plus basse) [Kantor et autres, 1980; Boroditch, 1976]. Les effets de cette dégradation supplémentaire dépendent des caractéristiques des systèmes en cause.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BORODITCH, S. V. [1976] Iskazheniya i pomekhi v mnogokanalnykh sistemakh radiosvyazi s chastotnoi modulyatsiei (Distortions et brouillages dans les systèmes de radiocommunication multivoies MF), Moscou, *Sviaz.*

CHAVDIA, Yu. D. et IGNATKINE, V. S. [1974] Predyskajenie signalov tsvetnogo televideniva na liniyakh sviazi s TCH-M (Préaccentuation des signaux de télévision en couleur sur les liaisons à modulation de fréquence). Trudy NIIR, **4**.

DOBA, S. et RIEKE, J. W. [1950] Clampers in video transmission. *Trans. AIEE*, **69**, 477.

KANTOR, L. Ya., MINASHINE, V. P., POVOLOTSKY, I. S. SOKOLOV, A. V. et TALYZIN, N. V. [1980], Sistema sputnikovogo televizionnogo veshchaniya «Moskva» (Le système de télévision à satellites «Moskva»), *Elektrosviaz*, **1**, 6-10.

KOUMYCH, E. I. [1970] Obrabotka televizionnogo signala v liniyakh sviazi s tchastotnoi modouliatsei (Traitement du signal de télévision dans les liaisons à modulation de fréquence). *Trudy NIIR*, **1**.

MUSTAFIDI, K. P. et FINOGEEV, G. M. [1976] Rasseyanie energii nesouchtchei pri peredatche televideniya (Dispersion d'énergie porteuse dans une émission de télévision). *Elektrosviaz*, **1**, 11-16.

SAVAGE, D. C. [1962] Three types of television signal stabilizing amplifier. Report of International Television Conference, IEE, 351, Londres, Royaume-Uni.

YAM, S. E. [printemps 1980] New TV energy dispersal techniques for interference reduction. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 10, **1**, 103-148.

ANNEXE III

MÉTHODES DE DISPERSION DE L'ÉNERGIE A UTILISER AVEC DES SIGNAUX NUMÉRIQUES

1. Généralités

Lorsque le train d'impulsions d'information présente une structure aléatoire, l'énergie de la porteuse radioélectrique est suffisamment dispersée pour qu'il y ait affaiblissement des crêtes de la densité surfacique de puissance produite à la surface de la Terre par les émissions de la station spatiale. En revanche, si ce train d'impulsions comprend une structure fixe avec répétition périodique, il apparaît des composantes de raies dans le spectre de la porteuse radioélectrique, la conséquence étant que certaines crêtes de la densité surfacique de puissance produite à la surface de la Terre peuvent dépasser le niveau recommandé par le CCIR.

Les méthodes de dispersion d'énergie décrites ici ont pour but de réduire les crêtes du spectre, en produisant un train d'impulsions de transmission semblable à une structure aléatoire, quelles que soient les structures contenues dans ce train d'impulsions. On trouvera au § 3 la description de deux méthodes de dispersion de l'énergie.

2. Spectre des signaux numériques à modulation par déplacement de phase

Le spectre d'une porteuse modulée par des inversions de phase idéales se compose de «raies»; pour une séquence pseudo-aléatoire comprenant N symboles ayant chacun une durée de t secondes, les raies sont espacées de $1/Nt$ Hz. Le spectre de puissance de ces raies est donné, en première approximation, par l'expression suivante:

$$W(f) \approx \frac{1}{N} \left\{ \frac{\sin \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \delta \left(f - f_c - \frac{n}{Nt} \right) \qquad (1)$$

où

N: longueur de la séquence pseudo-aléatoire (symboles);

t: durée du symbole (secondes);

n: nombre entier;

f_c: fréquence de la porteuse radioélectrique (Hz);

δ: fonction delta.

La raie ayant l'amplitude maximale correspond à $n = 1$.

Lorsque la longueur de la séquence tend vers l'infini ($N \rightarrow \infty$), on a $Nt \rightarrow \infty$ et l'espacement des raies tend vers zéro. On obtient alors un spectre continu:

$$W(f) = t \left\{ \frac{\sin \pi (f - f_c) t}{\pi (f - f_c) t} \right\}^2 \text{ par Hz} \qquad (2)$$

On voit que, dans ce cas, la densité spectrale maximale correspond à la fréquence de la porteuse.

La formule (2) donne la valeur moyenne du spectre de puissance dans le cas idéal d'un train d'impulsions aléatoires. En fait, le signal modulant peut s'écarter considérablement de la forme aléatoire. Par exemple, dans le cas de la téléphonie MIC utilisant 8 bits par échantillon, il est probable qu'il y aura une périodicité bien marquée (1/8 du débit binaire) et, pendant les périodes où le volume de trafic sera peu important, il pourrait se faire que le signal émis soit constitué presque entièrement de zéros. Dans ces conditions, le spectre de la modulation par déplacement de phase aura une grande partie de sa puissance concentrée dans une seule raie spectrale, ou dans un petit nombre de raies, et le facteur de dispersion pourra être voisin de 0 dB.

S'ajoutant au caractère non aléatoire de la partie «information» du signal, il y aura aussi des structures répétitives dans les préambules des transmissions à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT).

D'autre part, dans un système réel le spectre subit des modifications du fait de la mise en forme des impulsions et/ou du filtrage après modulation. A noter cependant que ces effets sont les plus sensibles aux limites du spectre et que la densité spectrale maximale ne s'en trouve guère affectée.

Pour obtenir le degré de dispersion voulu, on peut faire l'addition modulo 2 d'une séquence pseudo-aléatoire de durée Nt et du train de bits ou de symboles d'information, comme le montre la Fig. 3.

Pour une largeur de bande de référence de 4 kHz, on peut définir comme suit un facteur de dispersion d'énergie (D):

$$D = 10 \log \frac{\text{puissance totale}}{\text{puissance maximale par bande de 4 kHz}} \qquad (3)$$

Lorsqu'on utilise une séquence pseudo-aléatoire pour effectuer la dispersion d'énergie, le degré de dispersion peut être évalué à l'aide des formules (1) et (3) pour $1/Nt \geqslant 4$ kHz, et à l'aide des formules (2) et (3) pour $1/Nt < 4$ kHz.

Les expressions ci-dessus montrent que le degré de dispersion est proportionnel à N tant que la durée de la séquence demeure inférieure à l'inverse de la largeur de bande de référence. On gagne peu en dispersion dès que la durée de la séquence atteint 250 µs (largeur de bande de référence de 4 kHz).

3. Méthodes de dispersion de l'énergie

3.1 *Méthode 1: «Embrouilleur» pseudo-aléatoire*

Cette méthode consiste à maintenir le train d'impulsions de transmission dans un état similaire à celui qu'il aurait dans le cas d'une structure aléatoire, quel que soit le degré d'occupation des voies. Pour ce faire, on réalise la synthèse d'une séquence pseudo-aléatoire provenant du train d'impulsions de transmission produit dans un générateur de code pseudo-aléatoire utilisant un circuit OU exclusif (additionneur modulo 2). La Fig. 3a représente le schéma de l'équipement de ce système de dispersion de l'énergie à l'émission. Un équipement récepteur qui comporte un générateur de code pseudo-aléatoire produisant la même structure de code que dans l'équipement émetteur restitue l'information initiale: cette opération s'effectue par synthèse de la séquence de code pseudo-aléatoire produite par le générateur de code pseudo-aléatoire et du train d'impulsions de transmission, dans un circuit OU exclusif. La Fig. 3b représente schématiquement un tel équipement en réception.

Un des avantages de cette méthode réside dans le fait que la dispersion n'entraîne aucune diminution de la qualité du train d'impulsions d'information. Son inconvénient est d'exiger la synchronisation du générateur de code pseudo-aléatoire de l'équipement de réception avec le générateur de l'équipement d'émission. Il faut signaler cependant que, dans le cas des systèmes AMRT, cette synchronisation peut être obtenue grâce au signal de synchronisation des paquets qui est fourni par l'équipement récepteur; dans ces conditions, on n'aura pas besoin de prévoir un dispositif supplémentaire pour la synchronisation.

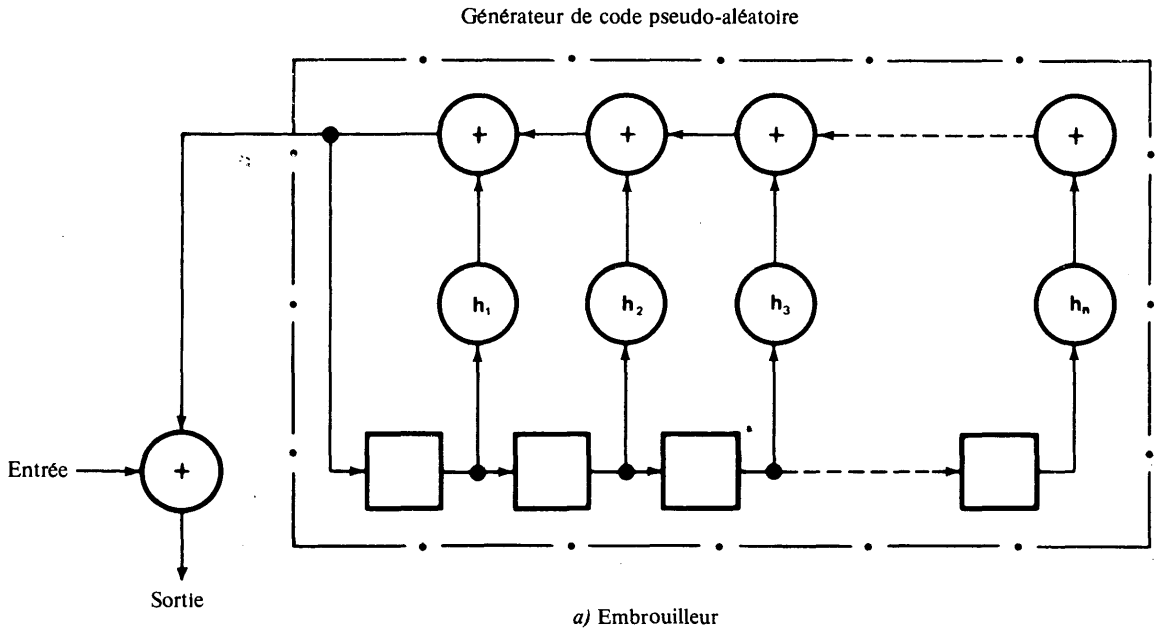
Il convient de noter que le débit de symboles de la séquence pseudo-aléatoire n'est pas forcément égal à celui du train d'impulsions d'information.

On a effectué des transmissions expérimentales de télévision numérique par satellite [Hopkins et autres, 1981], dans lesquelles on a mesuré le facteur de dispersion d'énergie. Avec un signal MDP quadrivalent à 60 Mbit/s et une séquence d'embrouillage pseudo-aléatoire à 11 échelons, on a mesuré un facteur de dispersion de 37 dB. Avec ce type de signal, le facteur de dispersion optimal serait théoriquement de 38,7 dB.

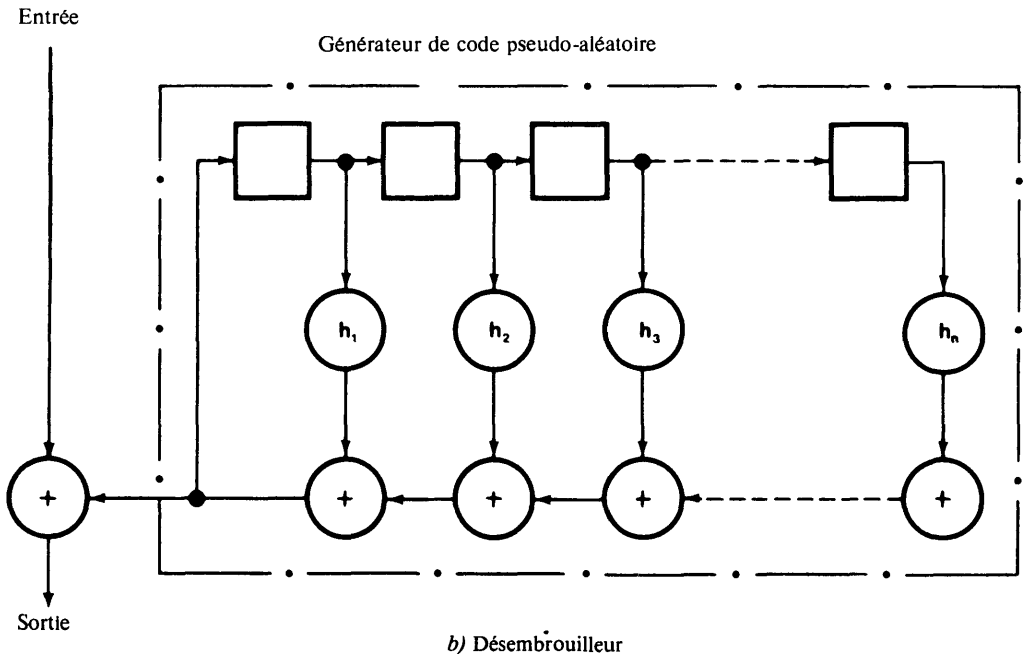
3.2 *Méthode 2: «Auto-embrouilleur»*

Pour mettre en œuvre cette méthode de dispersion d'énergie, on utilise respectivement dans l'équipement d'émission et dans l'équipement de réception des registres à décalage ayant une boucle de contre-réaction et une boucle de réaction. Dans l'équipement d'émission, on effectue une conversion de code pour chaque bit du train d'impulsions d'information. A la réception, chaque bit est reconverti afin de restituer le train d'impulsions d'information initial. Les Fig. 4a et 4b représentent respectivement un «embrouilleur» et un «désembrouilleur» typiques.

Un des avantages de cette méthode de dispersion de l'énergie réside dans le fait que l'on n'a pas besoin de synchroniser l'«embrouilleur» et le «désembrouilleur». Il faut toutefois signaler l'inconvénient suivant: si l'on désigne par r le nombre d'étages du registre à décalage, l'état initial de ce registre affecte les r premiers bits du train d'impulsions de transmission; en conséquence, un seul bit erroné dans le canal radioélectrique affecte les r bits qui le suivent. A noter cependant que cette méthode peut être associée à un système de détection et de correction des erreurs; elle peut donner une dispersion efficace de l'énergie dans les systèmes de transmission de données MIC, en particulier ceux qui fonctionnent selon le mode continu, par opposition au mode AMRT.



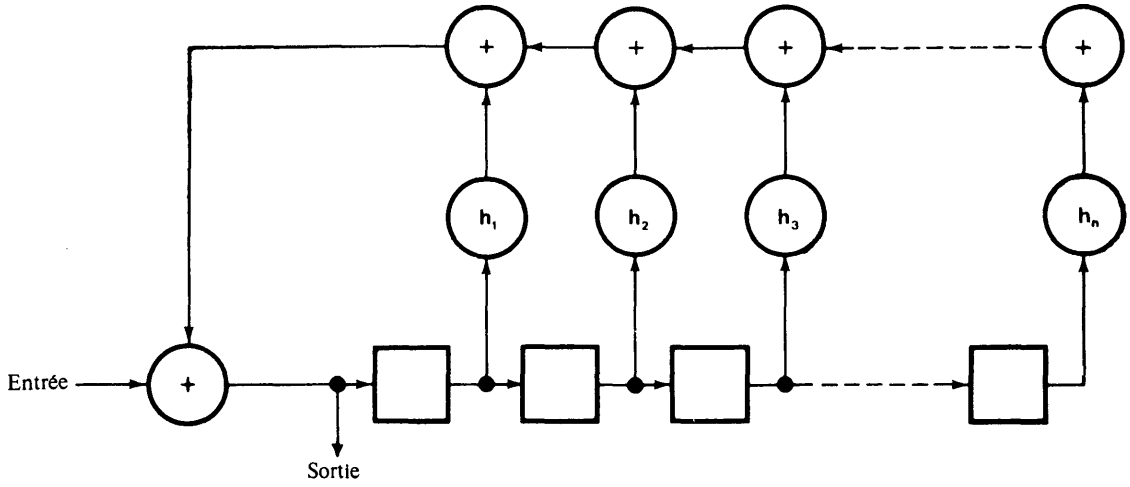
a) Embrouilleur



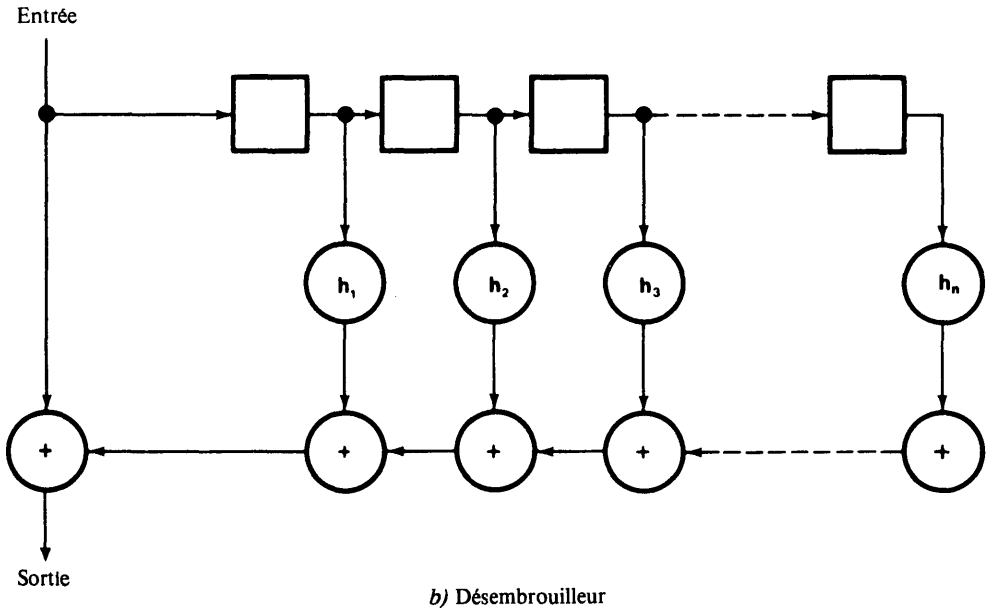
b) Désembrouilleur

FIGURE 3 — *Exemple de circuits de dispersion d'énergie pour la méthode 1*

Note. — h_1, $h_2 \ldots h_n$ représentent les connexions internes du registre à décalage qui déterminent la séquence de code.



a) Embrouilleur



b) Désembrouilleur

FIGURE 4 — *Exemple de circuits de dispersion d'énergie pour la méthode 2*

Note. — h_1, $h_2 \ldots h_n$ représentent les connexions internes du registre à décalage qui déterminent la séquence de code.

4. Facteur de dispersion de l'énergie dans les systèmes AMRT

Le degré de dispersion obtenu avec la méthode 1 est directement proportionnel à la longueur de la séquence pseudo-aléatoire. Toutefois, il n'y a aucun intérêt à utiliser une séquence d'une durée supérieure à 250 µs puisque les raies du spectre de dispersion auraient alors une séparation inférieure à 4 kHz. Dans un système AMRT, le signal pseudo-aléatoire produit dans le récepteur peut être très facilement synchronisé avec celui de l'émetteur si la séquence recommence à partir du début de chaque paquet AMRT. Cela signifie que la longueur d'une séquence est généralement inférieure à 250 µs et que l'on n'obtient pas une dispersion idéale.

Les effets de la dispersion de l'énergie pour un signal AMRT dépendent de la longueur de la séquence pseudo-aléatoire, de la longueur de la trame, du nombre de paquets, de la longueur de chaque paquet, des méthodes de dispersion d'énergie, etc. Si l'on suppose, pour simplifier, que la longueur de chaque paquet est égale ou inférieure à 250 µs et que la structure de dispersion est la même pour chaque paquet pseudo-aléatoire, le facteur de dispersion de l'énergie (D) peut être obtenu approximativement à l'aide des équations:

$$D = 10 \log N + 10 \log B - K, \text{ lorsque } N < M \quad (4)$$

$$D = 10 \log M + 10 \log B - K, \text{ lorsque } N > M \quad (5)$$

dans lesquelles:

N: longueur de la séquence pseudo-aléatoire (symboles);

M: longueur de la séquence d'information (symboles);

B: nombre de paquets dans une trame;

K: marge pour l'effet de dispersion de l'énergie.

Pour les équations ci-dessus, K est le terme de variation statistique indiquant le degré de décroissance des effets de la dispersion de l'énergie causés par:

- la coïncidence partielle entre une séquence d'information et une séquence pseudo-aléatoire,
- la différence entre la longueur de la séquence d'information et celle de la séquence pseudo-aléatoire,
- la cohérence de phase de la porteuse entre les paquets.

Parmi ces effets, on peut évaluer le premier comme suit: lorsque la séquence d'information a une faible corrélation de trame, la marge due à la coïncidence partielle dépend de la période d'observation du spectre de puissance. Au contraire, lorsque la séquence d'information a une forte corrélation de trame, la séquence a presque la même structure dans chaque trame, de telle sorte que l'on peut estimer sa marge en considérant la période de trame comme la période d'observation susmentionnée.

Le deuxième effet peut être rendu négligeable si l'on choisit comme il convient le degré et la valeur initiale de la séquence pseudo-aléatoire, si la longueur de celle-ci est inférieure à plusieurs séquences d'information.

Le troisième effet est également négligeable puisque la fréquence porteuse de chaque paquet diffère généralement de plusieurs centaines de Hz des fréquences porteuses des paquets adjacents.

Il est évident que la complexité du système est fortement réduite si la séquence pseudo-aléatoire n'est appliquée qu'à la partie du signal contenant l'information et non pas au préambule du paquet AMRT. En général, le préambule est constitué, du moins en partie, par une simple structure répétitive. Dans certains cas, il peut même contenir une période de porteuse non modulée. Les résultats présentés dans le Tableau III ci-après montrent qu'avec une structure répétitive 0011 pour le préambule, dans un système MDP à quatre phases, le préambule ne représente pas une part importante de la densité spectrale maximale, sauf peut-être pour les systèmes à faible débit binaire. On peut imaginer d'autres structures de préambule ayant la même durée que celle admise dans le Tableau III; avec ces structures, la dégradation ne dépasserait pas 3 dB.

Pour montrer quels facteurs de dispersion on pourrait obtenir dans la pratique, le Tableau III donne ces valeurs pour un système AMRT dans lequel le préambule n'est pas dispersé. On a fait les hypothèses suivantes:

- longueur de trame: 125 µs;
- modulation: MDP à quatre phases;
- signal de préambule: 40 bits de structure 0011 en alternance;
- les fréquences porteuses émises par toutes les stations sont espacées de 4 kHz au maximum, mais le rythme des symboles dans les différentes stations n'est pas nécessairement en phase;
- les générateurs de séquences pseudo-aléatoires assurent la remise en phase de chaque paquet.

La variation statistique du spectre de puissance est telle que 1% des raies spectrales dépassera l'enveloppe des valeurs efficaces de 6,5 dB.

TABLEAU III — *Facteurs typiques de dispersion de l'énergie pour plusieurs valeurs de la longueur des séquences pseudo-aléatoires*

	Système à un seul accès			Système à 10 accès équivalents						Facteur de dispersion obtenu (dB)		
	Facteur de dispersion (dB)			Puissance maximale dans une bande de 4 kHz (dB par rapport à la puissance totale permanente)								
				a) due aux préambules			*b)* due à l'information					
Débit binaire (Mbit/s)	10	50	250	10	50	250	10	50	250	10	50	250
Signal de modulation aléatoire	31	38	45							31	38	45
Séquence pseudo-aléatoire de 127 bits	12	12	12	−23	−37	−51	−20	−22	−22	20	22	22
Séquence pseudo-aléatoire de 511 bits	18	18	18	−23	−37	−51	−20	−28	−28	20	28	28
Séquence pseudo-aléatoire de 2047 bits	24	24	24	−23	−37	−51	—	−29	−34	—	29	34
Séquence pseudo-aléatoire de 32 767 bits	25	32	36	−23	−37	−51	—	—	−36	—	—	36
Système MF typique à charge totale, occupant la même largeur de bande que le système numérique (sur la base d'un spectre gaussien et d'un rapport: largeur de bande radioélectrique/largeur de bande de base, égal à 15)	27	34	41									

5. Exemple de dispersion de l'énergie appliquée dans un système AMRT expérimental

Les techniques de dispersion de l'énergie couvertes par la méthode 1 ont été appliquées dans le système TTT, système AMRT expérimental (50 Mbit/s) mis au point au Japon pour utilisation dans les radiocommunications par satellite. Dans ce système, seuls sont brouillés les bits d'information; on a constaté cependant que le niveau de crête du spectre de puissance est abaissé d'environ 20 dB.

Il convient de noter que, lorsqu'on applique dans un système AMRT une dispersion d'énergie à l'aide d'une séquence pseudo-aléatoire, la probabilité de détection erronée d'un «mot unique» donné est susceptible d'augmenter d'une quantité qui dépend du mode de synchronisation du paquet.

On peut éviter la détection erronée du mot unique en changeant l'état initial de la séquence pseudo-aléatoire pour chaque trame.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HOPKINS, D. K. W., OSBORNE, D. W., WELLS, N. D. et WILSON, E. J. [1981] Experimental digital television transmissions through the OTS. Report of International Conference: Results of tests and experience with the European Test Satellite, IEE, Londres, Conf. Publ. N° 199.

BIBLIOGRAPHIE

JEFFERIS, A. K. [mai 1973] Spectral energy dispersal in digital communication satellite system. *Proc. IEE*, Vol. 120, **5**, 529-532.

RAPPORT 867

NIVEAU MAXIMAL ADMISSIBLE DE BROUILLAGE DES TRANSMISSIONS EN MODE SCPC DANS DES RÉSEAUX DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2D/4)

(1982)

1. Introduction

Les transmissions en mode SCPC sont devenues un service très fréquemment utilisé dans les systèmes du service fixe par satellite. Toutefois, leur nature même les rend sensibles au brouillage causé par d'autres transmissions ayant des composantes à densité spectrale élevée. Le brouillage le plus nuisible est celui causé par le signal de télévision analogique MF qui, pendant des périodes de temps importantes, peut avoir une dispersion inhérente négligeable de l'énergie de sa porteuse et peut par conséquent, requérir un isolement substantiel des transmissions SCPC lorsqu'il fonctionne à la même fréquence.

La dispersion artificielle de l'énergie, qui a été utilisée avec succès pour réduire le brouillage causé par les porteuses de télévision MF à d'autres porteuses de télévision MF et aux porteuses de téléphonie analogique MRF-MF à faible capacité, a été envisagée comme moyen de résoudre également le problème se posant pour les transmissions SCPC.

On trouvera aux paragraphes suivants un résumé des effets actuellement connus du brouillage causé aux transmissions SCPC du système INTELSAT par un type de porteuse de télévision MF dont l'énergie est dispersée artificiellement. Ces travaux ont abouti à la mise au point d'un ensemble de critères de brouillage applicables à de tels cas mais l'on doit poursuivre les études en tenant compte des caractéristiques propres à d'autres systèmes.

2. Brouillage dans des transmissions SCPC-MDP4 MIC à 8 éléments binaires

L'une des techniques de dispersion courantes appliquées aux transmissions de télévision analogique MF consiste à moduler la porteuse avec une onde triangulaire d'une excursion crête-à-crête donnée à une fréquence se trouvant aux alentours de la fréquence image («dispersion à onde triangulaire à basse fréquence»), et à supprimer cette onde à la réception. Lorsque l'excursion crête-à-crête est supérieure à la largeur de bande occupée du signal brouillé, la totalité de la puissance de la porteuse brouilleuse sera présente dans cette largeur de bande pendant environ la portion de temps correspondant au rapport de la largeur de bande occupée B à l'excursion crête-à-crête de la dispersion d'énergie Δf. Le rapport $\delta = B/\Delta f$ est, par analogie aux signaux de type impulsionnel, appelé le cycle d'utilisation.

L'Avis 523 stipule que la puissance totale du brouillage de pré-démodulation dans la téléphonie MIC à 8 éléments binaires, causée par des transmissions provenant d'autres réseaux du service fixe par satellite ne devrait pas dépasser i% de la puissance de bruit de pré-démodulation totale (dans la largeur de bande occupée de la porteuse brouilée), lorsque le taux net d'erreur sur les éléments binaires est de 10^{-6}. Le pourcentage i est égal à 10 pour les systèmes actuels, à 15 pour les systèmes futurs employant la réutilisation des fréquences à l'intérieur du même réseau, et à 20 pour les systèmes futurs ne fonctionnant pas avec réutilisation des fréquences dans le même réseau.

L'on applique le critère pour $i = 10\%$ à une transmission SCPC-MDP4 MIC à 7 éléments binaires à 64 kbit/s, telle qu'elle est utilisée dans le système INTELSAT; le rapport porteuse/bruit thermique équivalent net requis pour atteindre au taux d'erreur sur les bits de 10^{-6} est d'environ 14,0 dB [CCIR, 1978-82a], ce qui, lorsque $i = 10\%$, rend nécessaire un rapport porteuse/bruit (C/N) interne d'environ 14,5 dB et un rapport porteuse/brouillage (C/N) net total d'environ 24,5 dB.

On prévoit que les émissions MIC à 8 éléments binaires auront un comportement semblable aux émissions MIC à 7 éléments binaires pour lesquelles il existe des résultats de mesure.

A partir des résultats de mesure, et pour le cas le plus général de n brouilleurs non modulés identiques, ayant tous une dispersion de l'énergie triangulaire à basse fréquence identique mais sans corrélation, la Fig. 1 donne le rapport C/I nécessaire pour réaliser un taux d'erreur sur les bits de 10^{-6} en fonction de δ lorsque la valeur nette du rapport C/N est égale à 14,5 dB. Il faut noter que dans ce graphique, le I du quotient C/I est la somme des puissances porteuses brouilleuses. Si l'on utilisait pour chaque brouilleur la moyenne temporelle de puissance brouilleuse au lieu de la puissance brouilleuse totale, les valeurs requises de C/I devraient être augmentées de 10 log $1/\delta$.

Dans la pratique, un nombre maximal équivalent de 4 sources de brouillage pour un rapport δ faible permet une protection suffisante, et pour son processus de coordination entre systèmes [CCIR, 1978-82b], INTELSAT a estimé que le critère suivant est approprié pour le brouillage causé à une porteuse SCPC par une seule porteuse non modulée à dispersion d'énergie à onde triangulaire à basse fréquence:

$$C/I \geqslant 27{,}5 + 6 \log \delta \quad \text{dB} \tag{1}$$

C/I étant le rapport de la puissance de la porteuse SCPC à la puissance totale de l'onde porteuse du signal brouilleur non modulé à dispersion d'énergie. Ce critère maximal pour un seul cas de brouillage s'applique pour un pourcentage de 20% du temps et uniquement aux brouillages entre réseaux du service fixe par satellite.

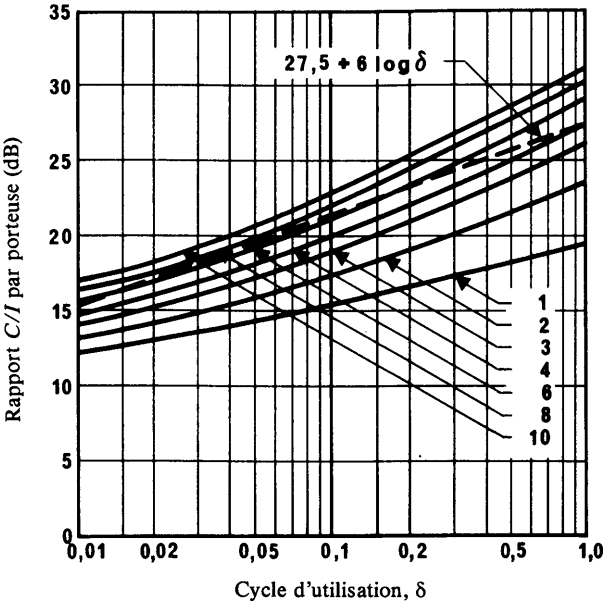


FIGURE 1 – *Exemple de relation entre le rapport C/I (porteuse utile/porteuse brouilleuse) par cas de brouillage, en fonction du cycle d'utilisation σ, et le nombre de cas de brouillages identiques équivalents*

3. Effet de la dispersion à la fréquence de ligne

Comme l'a suggéré Weinberger [1977], une augmentation de la fréquence de dispersion d'un ordre de grandeur correspondant à la fréquece de ligne (environ 16 kHz) devrait nettement améliorer l'efficacité de la dispersion d'énergie en tant que moyen de réduire le brouillage causé aux émissions SCPC.

C'est ce que des mesures [Yam, 1980] ont confirmé. Ces mesures ont été effectuées avec une dispersion de l'énergie à onde en dents de scie à la fréquence de ligne et avec une dispersion de l'énergie à ondes triangulaires égale à la moitié de la fréquence de ligne. L'excursion crête-à-crête de la dispersion d'énergie Δf varie de 0,25 MHz (δ = 0,15) à 2 MHz (δ = 0,02). L'augmentation admissible de la puissance de brouillage RF correspondant à cette dispersion à la fréquence de trame ne dépend que dans une faible proportion du bruit thermique présent, mais augmente brusquement lorsque le cycle d'utilisation décroît. Avec Δf = 0,25 MHz, l'amélioration est de 2 dB environ, à 0,5 MHz de 5 dB environ et à 2 MHz de 11 dB environ.

L'effet composite de plusieurs brouillages en cas de dispersion à la fréquence de ligne est calculé de la même façon que pour la dispersion à la fréquence de trame. Par conséquent, en utilisant le critère de trame suggéré comme point de départ et la différence de 5 dB environ pour une dispersion de 0,5 MHz (δ = 0,076), il est possible d'établir en cas de dispersion à la fréquence de ligne le critère classique de brouillage unique suivant:

$$C/I = 27{,}5 + 10{,}5 \log \delta \qquad \text{dB} \qquad (2)$$

où le rapport C/I est défini comme dans l'équation (1) et s'applique à 20% du temps entre des réseaux du service fixe par satellite. Il est souhaitable d'avoir d'autres confirmations expérimentales ou empiriques de la validité de ce critère concernant la dispersion à la fréquence de ligne.

La dispersion de l'énergie par une onde à la fréquence de ligne augmente d'une quantité pouvant atteindre 6 dB le niveau du brouillage causé à des circuits téléphoniques multivoie par satellite ou à des circuits par faisceaux hertziens de Terre, par rapport à une dispersion à basse fréquence, c'est-à-dire au plus égale à la fréquence de trame; la conséquence de cette dégradation supplémentaire dépend des caractéristiques des systèmes considérés. Voir le Rapport 384.

4. Brouillage causé à des émissions MF en mode SCPC utilisant un compresseur-extenseur syllabique

Des mesures préliminaires et des essais d'écoute subjectifs ont été effectués en vue d'évaluer le brouillage causé à des émissions téléphoniques MF en mode SCPC utilisant un compresseur-extenseur syllabique. Du point de vue des caractéristiques générales, l'évaluation du brouillage a permis d'établir subjectivement des conditions de différence sonore imperceptible entre un cas avec brouillage et un cas exempt de brouillage.

Le modem d'essai fonctionnait avec un rapport porteuse/bruit de 12 dB et une excursion produisant un rapport signal d'essai/bruit sans compresseur-extenseur de 32 dB. La largeur de bande du signal de pré-démodulation était de 27 kHz. Un compresseur-extenseur syllabique dont l'amélioration connue due à la compression-extension est de 18 dB a alors été ajouté pour produire un rapport signal d'essai/bruit équivalent à 50 dB. Le signal brouilleur était une porteuse avec modulation à ondes triangulaires à 20 Hz et une excursion crête-à-crête variable.

Dans les essais subjectifs, on a constaté que pour un rapport C/I de 22 dB et en l'absence de dispersion d'énergie, et pour un rapport C/I de 9 dB en présence d'une excursion crête-à-crête de la dispersion d'énergie de 1 MHz, il n'était pas possible de détecter une variation du niveau de bruit de fond pendant les temps morts. Des mesures effectuées avec un voltmètre efficace ont confirmé ces résultats subjectifs. En appliquant la dispersion, les signaux vocaux n'étaient pas affectés lorsque le rapport C/I était égal ou supérieur à 9 dB, mais commençait à présenter une qualité de plus en plus «rocailleuse» lorsque le rapport C/I passait à moins de 8 dB.

Les deux valeurs repères de $C/I = 22$ dB à $\delta = 1{,}00$, et $C/I = 9$ dB à $\delta = 0{,}027$ laissent penser qu'un critère de brouillage unique de la forme

$$C/I = 26 + 8 \log \delta \qquad \text{dB} \tag{3}$$

comportant une tolérance générale de 4 dB pour l'accumulation de plusieurs sources de brouillage, pourrait être provisoirement utile en ce qui concerne la coordination de calculs faisant intervenir le type d'émission MF en mode SCPC à compression-extension décrit ci-dessus. Dans ce cas-là également, il est souhaitable d'avoir une confirmation expérimentale ou empirique de la validité de l'équation (3).

On ne dispose encore d'aucun renseignement concernant le brouillage causé à des émissions MF en mode SCPC à compression-extension par un signal de télévision avec dispersion d'énergie à la fréquence de ligne.

5. Modulation delta

Il est possible d'utiliser certains systèmes en mode SCPC à modulation delta. La modulation delta est, par nature, moins sensible au brouillage que les systèmes MIC-MDP en mode SCPC. Cela est dû au fait que les erreurs sur les bits causées par le brouillage à la sortie du démodulateur MDP ne provoquent pas de variations de niveau notables dans les signaux à modulation delta, ce qui n'est pas le cas pour les signaux MIC-MDP.

Il convient de noter que les émissions à modulation delta et les émissions MF en mode SCPC avec compression-extension nécessitent des signaux de puissance moindre que les émissions MIC-MDP en mode SCPC. Cela tiendrait à annuler les avantages dus à une moindre sensibilité au brouillage (par rapport à ceux qu'offrent les émissions MIC-MDP en mode SCPC).

Avant de pouvoir adopter des critères définitifs, il est nécessaire d'effectuer d'autres études et d'autres mesures dans le domaine général des brouillages causés aux émissions SCPC par des émissions de télévision ayant subi une dispersion d'énergie.

6. Résumé et conclusions

Un critère pour un brouilleur unique ayant la forme générale indiquée dans l'équation (1) a été utilisé par INTELSAT dans la coordination entre réseaux du service fixe par satellite utilisant des transmissions de télévision analogique MF avec dispersion d'énergie à la fréquence de trame et des transmissions MIC-MDP à 7 bits en mode SCPC.

Les résultats des mesures faisant intervenir la dispersion à la fréquence de ligne et les deux mêmes types de signaux montrent qu'un critère pour un seul brouillage ayant la forme indiquée dans la formule (2) peut être approprié.

Les résultats d'autres études expérimentales visant à évaluer les brouillages causés à des transmissions MF en mode SCPC avec compression-extension par des émissions de télévision MF en mode analogique avec dispersion d'énergie à la fréquence de trame montrent qu'un critère correspondant à la formule (3) peut convenir pour un seul brouilleur.

Il est nécessaire de poursuivre les travaux pour déterminer les critères de brouilleur unique des transmissions en mode SCPC. Ces travaux doivent aussi porter sur les effets sur des systèmes SCPC utilisant toutes les méthodes de modulation ainsi que sur les effets d'autres types de techniques de dispersion d'énergie.

Il y a lieu de noter aussi qu'on pourrait rencontrer des difficultés pratiques pour disperser l'énergie à la fréquence de ligne sur des liaisons de connexion vers des satellites de radiodiffusion, car l'élimination des signaux de dispersion aux stations terminales réceptrices individuelles nécessiterait un dispositif assez complexe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

WEINBERGER, H. K. [1977] TV energy dispersal waweform. IEEE National Telecommunication Conference (NTC-77). Conf. Rec. 41:1-1-41:1-3.

YAM, S. E. [printemps 1980] New energy dispersal techniques for interference reduction. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 10, **1**, 103-150.

Documents du CCIR

[1978-82]: **a.** 4/156 (INTELSAT); **b.** 4/157 (INTELSAT).

AVIS 464-1

CARACTÉRISTIQUES DE PRÉACCENTUATION POUR LES SYSTÈMES A MODULATION DE FRÉQUENCE POUR LA TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2D/4)

(1970-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la caractéristique de préaccentuation devrait, de préférence, être telle que l'excursion efficace de fréquence due au signal de téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence soit la même avec et sans préaccentuation;

b) que, dans le cas d'un système à modulation de fréquence pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence fonctionnant bien au-dessus du seuil, le bruit thermique est maximal dans la voie la plus élevée et décroît avec les fréquences de la bande de base;

c) que, dans le cas d'un système à modulation de phase ou a modulation de fréquence avec préaccentuation de 20 dB par décade, fonctionnant bien au-dessus du seuil, le bruit thermique est constant dans toute la bande de base;

d) que le bruit thermique dans la voie la plus élevée d'un système à modulation de phase est amélioré d'environ 4,8 dB par rapport au cas de la modulation de fréquence dans cette même voie, dans l'hypothèse où les deux types de systèmes fonctionnent bien au-dessus du seuil et ont été réglés à la même excursion efficace de fréquence multivoie;

e) que le fait de réduire l'excursion de fréquence à mesure que les fréquences de la bande de base décroissent, pour un système à modulation de phase, rend ce système plus sensible au bruit aux basses fréquences, et notamment au bruit provenant des démodulateurs à abaissement de seuil fonctionnant au voisinage du seuil;

f) que, pour les stations terriennes fonctionnant normalement au-dessus du seuil, l'efficacité de l'utilisation de la puissance d'émission du satellite n'est pratiquement pas modifiée lorsque la gamme de préaccentuation passe d'une valeur inférieure à 6 dB à environ 8 dB, mais que l'efficacité de l'utilisation de la largeur de bande radioélectrique augmente légèrement avec cette gamme;

g) que, à l'heure actuelle, on ne dispose pas d'assez de renseignements pour pouvoir déterminer la caractéristique de préaccentuation optimale pour les sytèmes à porteuses radioélectriques ayant une capacité inférieure à 12 voies téléphoniques,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que, dans les systèmes du service fixe par satellite à modulation de fréquence, les porteuses radioélectriques ayant une capacité égale ou supérieure à 12 voies téléphoniques devraient être utilisées avec préaccentuation et avec la même caractéristique réduite de préaccentuation normalisée;

2. que la caractéristique de préaccentuation relative aux systèmes ayant une capacité inférieure à 12 voies téléphoniques devrait faire l'objet d'une étude plus poussée;

3. que la caractéristique de préaccentuation préférée est donnée par l'expression:

$$\text{Excursion de fréquence relative de la tonalité d'essai à la fréquence } f = 5 - 10 \log \left[1 + \frac{6{,}90}{1 + \frac{5{,}25}{\left(\frac{f_r}{f} - \frac{f}{f_r}\right)^2}} \right] \text{ dB}$$

dans laquelle $f_r = 1{,}25\ f_{max}$ est la fréquence de résonance du réseau, f_{max} la fréquence la plus élevée de la bande de base des voies téléphoniques et f la fréquence de la bande de base. La variation de l'excursion en fonction de la fréquence est représentée à la Fig. 1;

4. que la tolérance sur la réponse en fréquence de la caractéristique de préaccentuation ainsi que sur la caractéristique de désaccentuation devrait être telle qu'entre les fréquences limites nominales inférieure et supérieure de la bande de base, l'écart entre la caractéristique d'un réseau pratiquement utilisé et la caractéristique théorique soit compris entre les limites de $\pm$ (0,1 + 0,05 f/f_{max}) dB, f étant la fréquence comprise dans la bande de base et f_{max} la fréquence nominale la plus élevée de la bande de base. Cela correspond à des tolérances sur les éléments du réseau d'environ $\pm$ 1% pour les résistances et d'environ $\pm$ 0,5% pour les capacités et les selfs. De plus, cet écart ne devrait pas présenter de variations rapides à l'intérieur de cette bande de fréquences.

Note 1. – Il est reconnu qu'il peut y avoir avantage à réaliser la caractéristique de préaccentuation en insérant un réseau en divers emplacements, selon le type d'équipement. Les Fig. 2a) et 2b) représentent respectivement des exemples de réseaux de préaccentuation et de désaccentuation destinés à être insérés entre une source à tension constante et une charge à circuit ouvert; les Fig. 3a) et 3b) représentent respectivement des exemples de réseaux de préaccentuation et de désaccentuation destinés à être insérés entre des impédances d'entrée et de sortie résistives et adaptées.

Note 2. – Il convient de remarquer, au sujet de la formule donnée au § 3 du présent Avis, que la fréquence pour laquelle l'excursion avec préaccentuation correspond à l'excursion sans préaccentuation est égale à 0,61320 f_{max}. Il peut y avoir avantage à adopter cette fréquence pour procéder aux mesures d'affaiblissement entre stations terminales où apparaît la bande de base, lorsque les équipements de multiplexage ne sont pas en service.

Note 3. – Il est reconnu que, dans certains cas, il peut être désirable d'utiliser d'autres valeurs pour la caractéristique de préaccentuation, après accord entre les administrations intéressées.

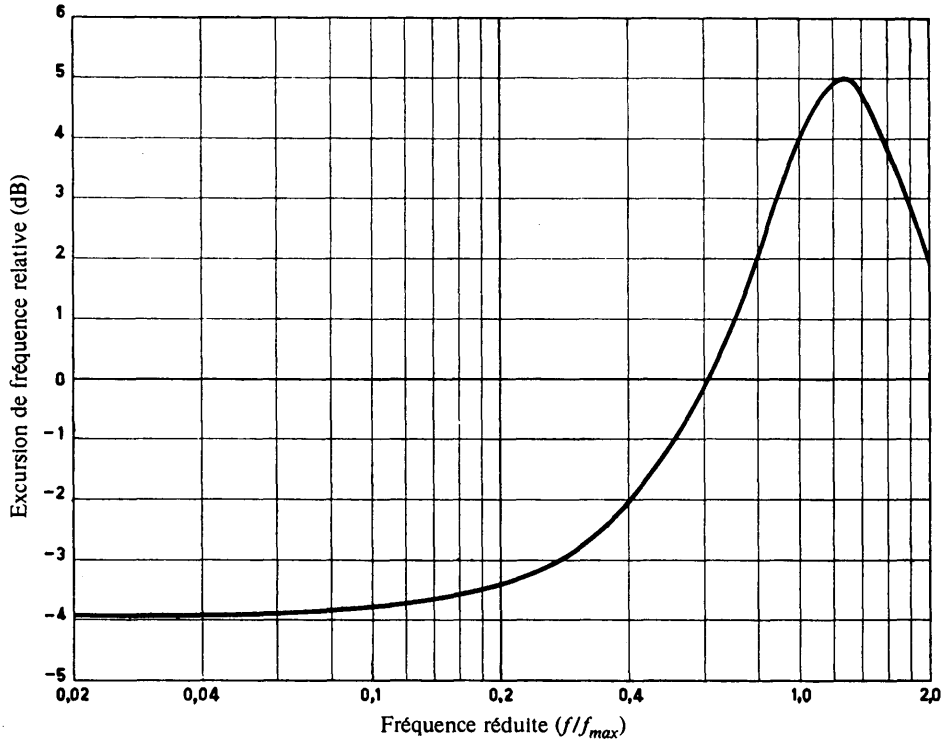
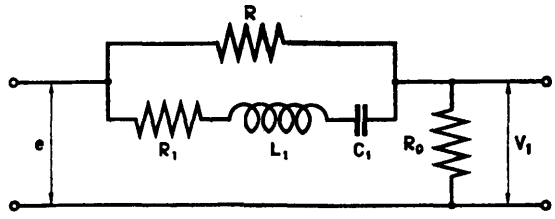


FIGURE 1 — *Caractéristique de préaccentuation pour la téléphonie*



$R = 1{,}81\ R_0$

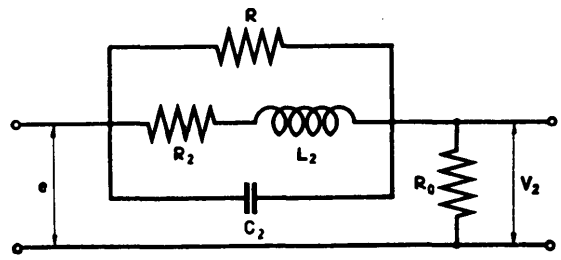
$R_1 < 0{,}01\ R_0$ en f_r

$\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 0{,}79\ R_0$

$f_r = 1{,}25\ f_{max} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}$

f_{max} désignant la fréquence la plus élevée de la bande de base

a) Réseau de préaccentuation



$R = 1{,}81\ R_0$

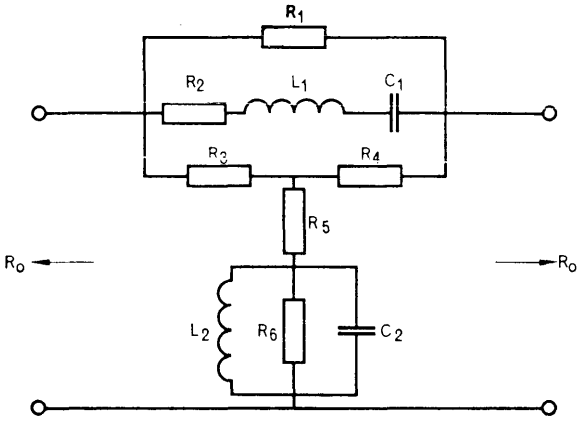
$R_2 < 0{,}02\ R_0$ en f_r

$\sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = 1{,}47\ R_0$

$f_r = 1{,}25\ f_{max} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$

b) Réseau de désaccentuation

FIGURE 2 — *Réseaux de préaccentuation et de désaccentuation destinés à être insérés entre une source à tension constante et une charge à circuit ouvert*



$R_1 = 1{,}81\ R_0$

$R_2 < 0{,}01\ R_0$

$R_3 = R_4 = R_0$

$R_5 = \dfrac{R_0}{1{,}81}$

$R_6 > 100\ R_0$

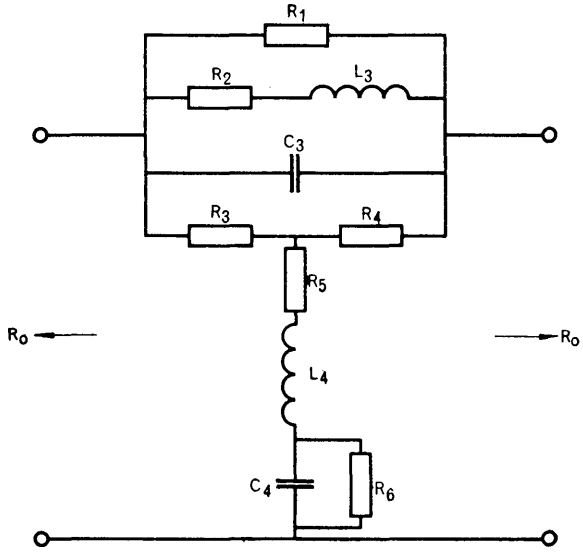
$f_r = 1{,}25\, f_{max} = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{L_1 C_1}}$

$= \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{L_2 C_2}}$

$\sqrt{\dfrac{L_1}{C_1}} = 0{,}79\ R_0$

$\sqrt{\dfrac{L_2}{C_2}} = \dfrac{R_0}{0{,}79}$

a) Réseau de préaccentuation



$R_1 = 1{,}81\ R_0$

$R_2 < 0{,}01\ R_0$

$R_3 = R_4 = R_0$

$R_5 = \dfrac{R_0}{1{,}81}$

$R_6 > 100\ R_0$

$f_r = 1{,}25\, f_{max} = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{L_3 C_3}}$

$= \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{L_4 C_4}}$

$\sqrt{\dfrac{L_3}{C_3}} = 1{,}47\ R_0$

$\sqrt{\dfrac{L_4}{C_4}} = \dfrac{R_0}{1{,}47}$

b) Réseau de désaccentuation

FIGURE 3 — *Réseaux de préaccentuation et de désaccentuation destinés à être insérés entre des impédances d'entrée et de sortie purement résistantes et adaptées*

RAPPORT 212-3

EMPLOI DE LA PRÉACCENTUATION DANS LES SYSTÈMES A MODULATION DE FRÉQUENCE POUR LA TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE ET LA TÉLÉVISION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1963-1966-1970-1974)

1. Introduction

L'emploi de la préaccentuation dans les systèmes du service fixe par satellite transmettant en modulation de fréquence de la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence se traduit par une amélioration du rapport signal/bruit dans les canaux du système ayant les fréquences les plus élevées et permet ainsi d'alléger les exigences relatives à la puissance et à la largeur de bande de l'émetteur du satellite.

L'emploi de la préaccentuation pour la télévision modifie la répartition de l'énergie émise aux fréquences radioélectriques des systèmes du service fixe par satellite de telle façon que l'on obtient une réduction, sensible dans certains cas, des possibilités de brouillage à l'intérieur de systèmes du service fixe par satellite, entre ces systèmes, et entre des systèmes du service fixe par satellite et des systèmes de faisceaux hertziens utilisant les mêmes bandes de fréquences.

L'emploi de la préaccentuation pour la télévision peut permettre aussi d'augmenter l'excursion efficace de fréquence du système du service fixe par satellite, améliorant ainsi le rapport signal/bruit, bien qu'une augmentation trop importante de l'excursion puisse compromettre la réduction des possibilités de brouillage.

Les excursions et préaccentuations à utiliser pour obtenir la meilleure transmission possible de certaines normes de signaux de télévision peuvent différer sensiblement de celles recommandées pour la téléphonie.

L'utilisation, par différentes administrations, des possibilités offertes par les systèmes du service fixe par satellite, y compris l'emploi partagé des répéteurs des satellites, serait facilitée par un accord sur les caractéristiques de préaccentuation pour de tels systèmes utilisant la modulation de fréquence.

Il n'a pas encore été possible de recommander les caractéristiques de préaccentuation préférées pour les systèmes du service fixe par satellite utilisés pour la télévision. Cette question devrait faire l'objet d'études plus poussées, mais on trouvera, au § 3 du présent Rapport, des renseignements qui pourraient être utiles pour ces études.

2. Téléphonie

La préaccentuation aura pour effet d'améliorer le rapport signal/bruit dans les voies de haute fréquence et de le détériorer dans les voies de basse fréquence. Il peut en résulter une modification du rapport porteuse/bruit pour lequel le bruit atteint 50 000 pWp en un point de niveau relatif zéro dans la voie la plus défavorisée. Chacun de ces effets aura des répercussions sur la puissance du satellite et sur la largeur de bande nécessaire pour satisfaire aux conditions fixées pour le bruit dans l'Avis 353. De plus, la caractéristique optimale pour un système fonctionnant au niveau du seuil ou au-dessous de celui-ci pendant une proportion considérable du temps peut ne pas être la même que pour des systèmes fonctionnant généralement au-dessus du seuil.

La marge de seuil des systèmes actuels de satellite est généralement suffisante pour éviter qu'ils ne fonctionnent au-dessous du seuil, sauf pendant de très petites proportions du temps et il devrait en aller de même pour les systèmes futurs. C'est pourquoi, pour une utilisation courante, la caractéristique de préaccentuation optimale sera celle qui présente une gamme d'affaiblissements relativement étendue.

La mesure de rapports signal/bruit dans un système en exploitation a confirmé que le réseau décrit dans l'Avis 464, qui a une gamme d'affaiblissements de 8 dB, donne dans la pratique des résultats satisfaisants.

Toutefois, pour des systèmes fonctionnant plus près du seuil, il se peut que l'on constate que la gamme d'affaiblissements optimale est plus étroite.

3. Télévision

Pour la transmission des signaux de télévision en couleur, il convient d'accorder une attention particulière:

- au bruit dans la bande vidéo;
- à la distorsion, notamment celle qui peut affecter les fréquences vidéo dans le canal de chrominance (au voisinage de 4,4 MHz pour les systèmes à 625 lignes);
- au seuil subjectif du récepteur.

L'insertion d'un réseau de préaccentuation a pour but:

- d'améliorer la valeur du rapport signal/bruit pondéré;
- de réduire la distorsion.

Ces objectifs doivent être atteints moyennant une dégradation minimale du seuil subjectif du récepteur.

Pour une largeur de bande donnée du système, la valeur du rapport «signal/bruit pondéré» peut être améliorée en modifiant la forme du spectre de bruit du signal vidéo, c'est-à-dire en modifiant l'excursion de la porteuse radioélectrique produite par les différentes composantes du signal vidéo.

Les critères qui influent sur la détermination de la caractéristique optimale de préaccentuation peuvent être différents pour les divers systèmes de télévision en couleur. Les résultats des études faites par certaines administrations sur les systèmes PAL et SECAM sont exposés ci-après.

L'optimisation de la caractéristique de préaccentuation pour la télévision en couleur dépend essentiellement de l'allure de la courbe de pondération adoptée pour la mesure du bruit. Les spécifications en sont données dans l'Avis 567 pour le système I à 625 lignes mais cette courbe n'a pas été universellement adoptée et il sera par conséquent difficile d'adopter une seule caractéristique nouvelle de préaccentuation. Les travaux décrits ci-après permettent d'envisager une méthode pour résoudre ce problème.

3.1 *Système PAL à 625 lignes (systèmes B, G et H)*

Les calculs théoriques ont montré [CCIR, 1966-69a] que, pour une valeur donnée du rapport «signal/bruit non pondéré», on obtient la valeur maximale du rapport «signal/bruit pondéré» lorsque la caractéristique de désaccentuation produit un spectre de bruit qui est uniforme en fonction de la fréquence dans toute la largeur de bande vidéo (0-5 MHz). En appliquant ce principe à une courbe particulière de pondération sur le bruit [CCIR, 1966-69b] on en déduit une nouvelle courbe de préaccentuation (voir Fig. 1) qui permet d'améliorer le rapport signal/bruit d'environ 2 dB (en supposant que la distribution du bruit est triangulaire). On comparera cette valeur avec l'amélioration d'environ 1 dB obtenue en utilisant la courbe de préaccentuation de l'Avis 405 (avec la même courbe de pondération de bruit).

Des expériences faites pour déterminer l'influence d'une limitation dans la bande de fréquences radioélectriques ont montré que, avec cette nouvelle courbe de préaccentuation, les distorsions différentielles sont de 5 fois à 15 fois plus petites (selon la forme du signal de modulation) qu'en l'absence de préaccentuation. Par ailleurs, le rapport luminance/chrominance est légèrement augmenté. La qualité globale de l'image, évaluée subjectivement, est fondamentalement inchangée. D'autres essais réalisés avec un récepteur fonctionnant au voisinage du seuil ont montré qu'en général l'emploi de la préaccentuation augmente le niveau du seuil évalué subjectivement, cette augmentation étant, par exemple, de 1,5 à 2 dB pour la courbe de préaccentuation de la Fig. 1 du présent Rapport ou pour la courbe B de la Fig. 1 de l'Avis 405 ou pour certaines autres courbes de préaccentuation.

D'autres études [Lari et Tomati, 1972] ont également montré qu'en choisissant convenablement la courbe de préaccentuation, il est possible de réduire quelque peu la puissance d'émission du satellite ou la largeur de bande requise pour la même valeur du rapport «signal/bruit pondéré» et la même marge au-dessus du seuil subjectif.

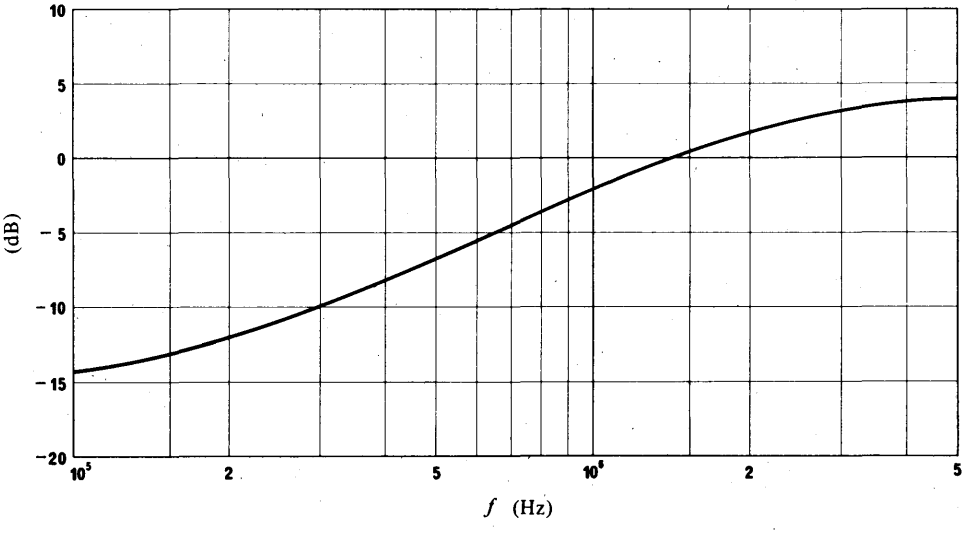


FIGURE 1 — *Caractéristiques expérimentales de préaccentuation pour le système PAL*

3.2 *Système SECAM à 625 lignes*

Avec les système SECAM, dans lequel le signal couleur est émis en modulant en fréquence une sous-porteuse à 4,43 MHz, la démodulation de cette sous-porteuse est soumise aux effets bien connus du seuil des démodulateurs de fréquence. De ce fait, lorsque le bruit dans le canal de chrominance devient important, l'image se détériore rapidement. Il apparaît nécessaire de déterminer les limites de bruit dans le canal de luminance et dans le canal de chrominance.

Ces limites ont été déterminées d'après des essais subjectifs sur des images dégradées par le bruit thermique [CCIR, 1970-74a]. Pour que la dégradation N_2 du signal de chrominance soit égale à la dégradation N_1 du signal de luminance, il faut que la relation suivante soit respectée:

$$8{,}5\ \text{dB} < 10 \log \frac{N_2}{N_1} < 9{,}5\ \text{dB} \qquad (1)$$

N_1 étant la puissance du bruit pondéré dans le signal de luminance, mesuré à la sortie du réseau selon les indications de l'Avis 567, et N_2 la puissance du bruit filtré dans le signal de chrominance, mesuré à la sortie du filtre passe-bande selon les indications de l'Avis 567.

Le réseau de préaccentuation conçu pour les systèmes de télévision monochrome à 625 lignes et décrit dans l'Avis 405 est maintenant utilisé pour les systèmes de télévision en couleur. Dans ce cas, il donne la valeur non optimale de 12 dB, comme l'indique l'équation suivante:

$$10 \log \frac{N_2}{N_1} \approx 12\ \text{dB} \qquad (2)$$

Il semble donc souhaitable de spécifier un nouveau réseau de préaccentuation pour le système de télévision en couleur SECAM. Ce réseau est semblable à celui de l'Avis 405 et sa fonction de transfert est la suivante:

$$-\frac{1}{y} \cdot \frac{1 + j\omega\tau_p}{1 + j\omega \dfrac{\tau_p}{y}} \qquad (3)$$

20 log y désignant l'affaiblissement maximal du réseau, en dB, et τ_p étant la constante de temps du réseau, en ns.

Les valeurs proposées pour cette fonction de transfert sont les suivantes:

y = 8 (au lieu de y = 5 dans l'Avis 405);

τ_p = 227 ns (au lieu de τ_p = 508 ns dans l'Avis 405).

Ces valeurs sont telles que les limites indiquées dans la relation (1) sont respectées.

La Fig. 2 montre comment cette caractéristique se situe par rapport à l'ancienne figurant dans l'Avis 405-1 pour les systèmes de télévision à 625 lignes, et ceci à égalité de gêne globale sur l'image. Il est clair que la nouvelle courbe est située en dessous de l'ancienne dans la plus grande partie de la bande vidéo; en conséquence, avec une cellule de ce type, l'encombrement spectral en radiofréquence sera réduit par rapport à celui correspondant à la cellule actuellement recommandée, et les distorsions vidéo non linéaires dues à la limitation de largeur de bande seront diminuées.

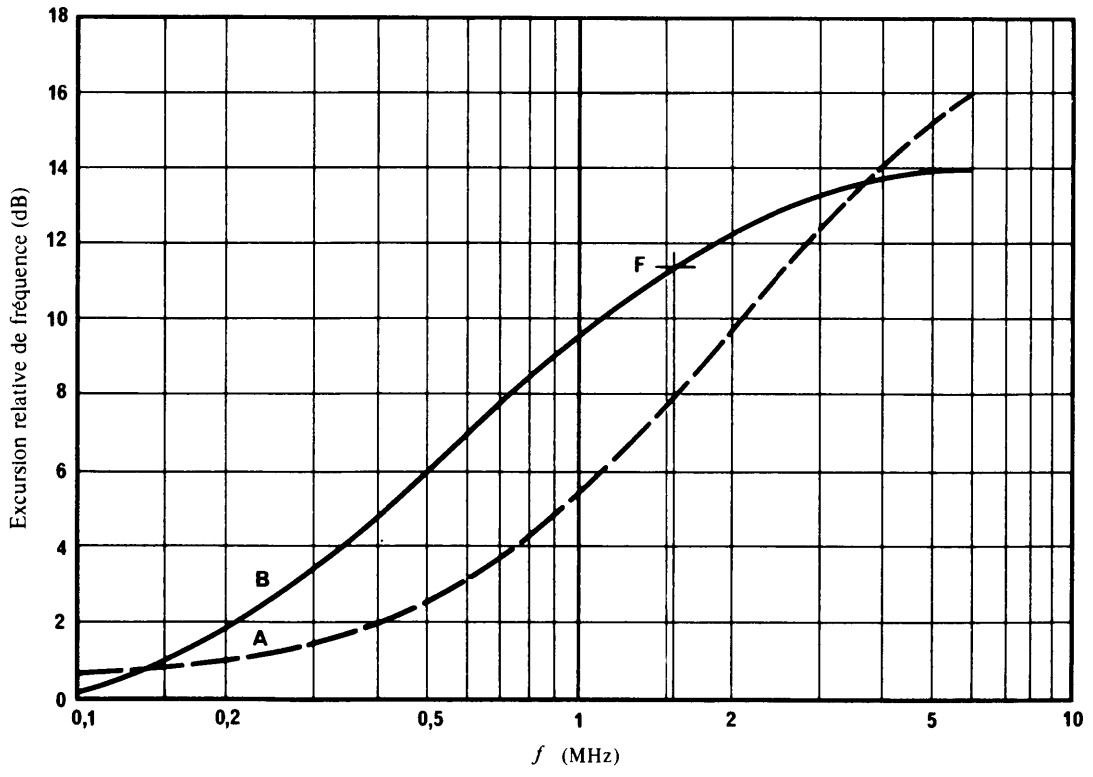


FIGURE 2

A: Courbe de préaccentuation calculée proposée pour le système SECAM
B: Courbe de préaccentuation recommandée dans l'Avis 405
F: Fréquence de référence

Il y a lieu de poursuivre les études pour faire en sorte que les liaisons par satellite utilisant cette nouvelle caractéristique soient conformes à tous égards aux spécifications de l'Avis 567 concernant le circuit fictif de référence.

3.3 *Système PAL à 625 lignes (système I)*

On a fait une étude [CCIR, 1970-74b] afin de vérifier la validité des caractéristiques de préaccentuation des Fig. 1 et 2 pour le système PAL à 625 lignes (système I). L'effet subjectif de la dégradation du rapport signal/bruit a été évalué par la méthode des unités de dégradation, dites «imps» [Lewis et Allnatt, 1968], en employant les réseaux de pondération du bruit spécifiés dans l'Avis 567.

On a admis que le bruit avait une caractéristique pratiquement triangulaire, ce qui est normalement le cas lorsque le système fonctionne au voisinage du seuil. Les résultats ont montré que, pour le système PAL (système I), le réseau de l'Avis 405 donne de meilleurs résultats que les deux autres. Cela peut bien provenir de ce que ces derniers ont été imaginés pour d'autres systèmes de télévision utilisant soit une largeur de bande vidéo différente, soit une modulation différente de la sous-porteuse de chrominance ainsi que des réseaux de pondération de bruit différents. Peut-être pourra-t-on un jour trouver une nouvelle caractéristique de préaccentuation meilleure que celle de l'Avis 405, mais, pour le moment, il ne semble pas justifié de la changer. Il convient de poursuivre les études notamment sur l'influence sur divers types de distorsions, en plus du rapport signal/bruit.

RÉFÉRENCES BILIOGRAPHIQUES

LARI, M. et TOMATI, L. [1972] Studio di un circuito di enfasi ottimizzato per trasmissioni TV a colori su sistemi a modulazione di frequenza e suo uso (Etude d'un circuit de préaccentuation optimale pour transmission de télévision en couleur sur système à modulation de fréquence et utilisation de ce circuit). *Elettronica e Telecommunicazioni*, **5**.

LEWIS, N. W. et ALLNATT, J. W. [1968] Subjective and objective impairments in television pictures. IEE Conference Publication No. 46, Partie 1.

Documents du CCIR

[1966-69]: **a.** Doc. CMTT/161 (Annexe) (Italie); **b.** Doc. CMTT/160 (Italie).

[1970-74]: **a.** Doc. 4/68 (France); **b.** Doc. 4/168 (Royaume-Uni).

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1966-69]: Doc. IV/258 (France).

[1970-74]: Doc. 4/85 (Italie).

AVIS 481-1

MESURES DE BRUIT EN COURS DE TRAFIC POUR LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE POUR LA TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE

(Question 20/4)

(1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des mesures au moyen d'un générateur de bruit blanc (voir l'Avis 482) ne sont possibles que sur un canal radioélectrique ne transmettant pas de trafic;

b) que les systèmes transmettant de la téléphonie multivoie ne peuvent pas être retirés du service à volonté pour les mesures;

c) que l'on ne dispose pas, aux fins de la maintenance, de canaux de réserve comme ceux que l'on utilise avec les faisceaux hertziens de Terre;

d) que des mesures de maintenance portant sur le bruit total (bruit thermique et bruit d'intermodulation) sont utiles pour déterminer les qualités de fonctionnement d'un système et doivent être faites en cours d'exploitation;

e) qu'il est commode de placer les voies de mesure en dehors de la bande totale du signal multiplex;

f) que, dans le cas où ces voies de mesure sont situées à l'extérieur de la bande totale du signal multiplex, elles devraient être placées aussi près que possible des limites de cette bande, pour permettre la mesure des produits d'intermodulation dus à la non-linéarité du système;

g) que, d'autre part, afin de faciliter et de rendre moins chère la construction des filtres, les voies de mesure ne devraient pas être placées trop près de ces limites;

h) que des mesures effectuées dans des voies situées à environ 10% au-dessus de la limite supérieure de la bande totale du signal multiplex sont généralement sensibles aux variations du bruit thermique et d'intermodulation dues aux circuits de l'équipement fonctionnant aux fréquences radioélectriques et intermédiaires;

j) qu'il est en général nécessaire d'employer des filtres coupe-bande à l'entrée du système pour affaiblir le bruit provenant du circuit d'arrivée dans les bandes occupées par les voies de mesure, et qu'il sera nécessaire de spécifier la qualité de fonctionnement minimale de ces filtres, à la fois dans leur bande affaiblie et aux extrémités de la bande totale du signal multiplex,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que, dans les liaisons du service fixe par satellite, le bruit mesuré en cours de trafic devrait l'être à la sortie du système, dans des bandes relativement étroites situées au-dessus de la bande totale du signal multiplex;

2. que les fréquences centrales des voies de mesure du bruit devraient être celles indiquées dans le Tableau I;

3. que l'affaiblissement du filtre coupe-bande situé à l'entrée du système devrait dépasser 50 dB dans une bande minimale de $\pm$ (0,005 f + 2) kHz (f étant la fréquence centrale en kHz de la voie de mesure). L'affaiblissement supplémentaire causé par l'insertion des filtres coupe-bande à l'extrémité supérieure de la bande totale du signal multiplex ne doit pas dépasser de plus de 0,3 dB l'affaiblissement supplémentaire causé au centre de la bande du signal multiplex;

4. que la bande effective des filtres passe-bande de l'équipement de réception doit être suffisamment étroite pour en permettre l'emploi avec le filtre coupe-bande indiqué ci-dessus;

5. que, dans tous les cas où l'on utilise des bandes de fréquences différentes, ou lorsque les méthodes de mesure sont différentes, on devrait conclure des accords particuliers entre les administrations concernées utilisant les mêmes systèmes spatiaux du service fixe par satellite.

TABLEAU I

Capacité du système (nombre de voies)	Limites de la bande occupée par les voies téléphoniques (kHz)	Fréquences centrales, f, des voies de mesure du bruit (kHz)
12	12- 60	66
24	12- 108	116
36	12- 156	172
48	12- 204	224
60	12- 252	277
72	12- 300	331
96	12- 408	448
132	12- 552	607
192	12- 804	884
252	12-1052	1157
312	12-1300	1499
432	12-1796	1976
612	12-2540	2794
792	12-3284	3612
972	12-4028	4430
1092	12-4892	5381
1332	12-5884	6300
1872	12-8120	8932

AVIS 482-1

MESURE DE LA QUALITÉ A L'AIDE D'UN SIGNAL A SPECTRE CONTINU UNIFORME, POUR LES SYSTÈMES QUI UTILISENT LA TÉLÉPHONIE A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION EN FRÉQUENCE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 20/4)

(1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il est souhaitable de mesurer la qualité des liaisons du service fixe par satellite pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'exploitation;

b) qu'un signal à spectre continu uniforme (bruit blanc) a des propriétés statistiques voisines de celles d'un signal multiplex quand le nombre de voies n'est pas trop faible;

c) que l'emploi d'un signal à spectre continu uniforme pour mesurer la qualité de telles liaisons est déjà répandu;

d) qu'il est nécessaire de normaliser les fréquences et les largeurs de bande des voies de mesure à employer pour de telles mesures;

e) que, pour des raisons de compatibilité sur le plan international, il est nécessaire de normaliser l'affaiblissement minimal et les largeurs de bande des filtres coupe-bande dont on peut avoir besoin dans le générateur de bruit blanc;

f) que le CCITT a indiqué, pour la planification des circuits téléphoniques, une valeur moyenne de la puissance des courants vocaux dans une bande de base d'un multiplex téléphonique à prendre en considération au cours de l'heure chargée (Avis G.223 du CCITT, *Livre Orange*, Vol. III-1),

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que la mesure de la qualité des liaisons du service fixe par satellite pour la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence devrait être effectuée avec un signal à spectre continu uniforme dans la bande de fréquences utilisée pour la transmission des voies téléphoniques;

2. que la puissance nominale du signal de mesure à spectre uniforme devrait correspondre à la charge conventionnelle spécifiée dans l'Avis G.223 du CCITT, *Livre Orange*, Vol. III-1; *

2.1 que l'équipement d'émission devrait permettre d'obtenir, à la sortie d'un filtre coupe-bande, un niveau de charge pouvant atteindre au moins +10 dB par rapport au niveau de puissance nominale indiqué ci-dessus;

2.2 que, dans la largeur de bande correspondant à la bande de base du système soumis aux mesures, la tension efficace du bruit mesurée dans une bande d'environ 2 kHz ne devrait pas varier de plus de ± 0,5 dB. On devrait obtenir ce degré d'uniformité du spectre dans une gamme de niveaux atteignant +6 dB par rapport au niveau de puissance nominale;

2.3 qu'à la sortie de l'équipement émetteur, le facteur de crête du signal de mesure à spectre uniforme devrait être d'environ 12 dB par rapport à la valeur efficace;

3. que la spécification des fréquences de coupure nominales effectives (fréquences de coupure d'un filtre théorique ayant une caractéristique de coupure rectangulaire idéale et transmettant la même puissance que le filtre réel) et celle des tolérances, pour les filtres limiteurs de bande qui sont proposés pour les diverses largeurs de bande des systèmes à mesurer, devrait être celle indiquée au Tableau I. (Afin de réduire le nombre des filtres nécessaires, on a, dans certains cas, adopté des compromis entre la fréquence de coupure nominale effective et la fréquence limite de la largeur de bande des systèmes. Compte tenu des tolérances spécifiées, les erreurs d'étalonnage résultant de ces compromis ne dépassent pas ± 0,1 dB et les erreurs commises dans la mesure du bruit d'intermodulation ne dépassent pas ± 0,2 dB dans l'hypothèse où le système fonctionne avec une préaccentuation conforme à l'Avis 464);

---

* Le niveau de la charge conventionnelle est donné en dBm0, par:

$-1 + 4 \log N$ pour $N < 240$ voies

$-15 + 10 \log N$ pour $N \geqslant 240$ voies.

3.1 que l'atténuation d'un filtre passe-bas doit être d'au moins 20 dB sur une fréquence supérieure de plus de 10% à la fréquence de coupure nominale et d'au moins 25 dB sur les fréquences supérieures de plus de 20% à cette même fréquence. L'atténuation d'un filtre passe-haut doit être d'au moins 25 dB sur les fréquences inférieures de plus de 20% à la fréquence de coupure nominale;

3.2 que, pour pouvoir limiter l'atténuation à l'égard des voies de mesure, la dispersion des valeurs de l'affaiblissement introduit par un couple quelconque de filtres passe-haut et passe-bas ne devrait pas dépasser 0,2 dB dans une gamme de fréquences englobant les voies de mesure inférieure et supérieure;

4. que le Tableau II contient les valeurs recommandées pour les caractéristiques d'atténuation du bruit dans chaque bande éliminée, à la sortie d'un équipement émetteur. La bande passante de chaque filtre coupe-bande doit être conçue pour couvrir au moins la plus grande gamme de fréquences de bande de base avec laquelle elle doit être utilisée, comme indiqué dans la colonne intitulée «Limites de la bande . . .» du Tableau I. Ces caractéristiques sont valables dans l'intervalle de température compris entre 10 et 40° C;

5. que, dans le cas où l'équipement de réception est relié directement à un équipement d'émission muni de filtres coupe-bande répondant juste aux conditions du § 4, si on considère le rapport entre, d'une part, la puissance de bruit indiquée par l'équipement de réception lorsque le filtre coupe-bande n'est pas en circuit et, d'autre part, celle qui est indiquée lorsque ce filtre est en circuit, ce rapport doit avoir une valeur au moins égale à 67 dB; cette condition est valable quand on applique une charge conventionnelle. Le récepteur doit avoir une largeur de bande effective minimale d'au moins 1,7 kHz; le niveau maximal de la puissance de bruit absolue, découlant d'une fuite occasionnée par un récepteur d'une largeur de bande effective de 1,74 kHz et correspondant à la valeur de fuite requise, est de −85,6 dBm0p.

6. que les administrations intéressées peuvent s'entendre pour prévoir des voies de mesure supplémentaire;

6.1 que, pour le choix et la détermination des caractéristiques techniques de tout nouveau filtre de mesure ou de limitation de bande, on devrait tenir compte des indications techniques de l'Annexe au Rapport 553.

Note. – On suppose que les mesures effectuées sur les systèmes du service fixe par satellite en exploitation se font avec une précision globale de ± 2 dB. On pourra se reporter également aux Annexes 1 et 2 de l'Avis G.228 du CCITT où il est question de la méthode de mesure ainsi que de la précision de ces mesures.

TABLEAU I

Capacité (voies)	Limites de la bande de fréquences occupée par les voies téléphoniques (kHz)	Fréquences de coupure réelles des filtres limiteurs de bande (kHz)		Fréquences des voies de mesure recommandées(1) (kHz)
		Passe-haut	Passe-bas	
12	12- 60	12 ± 0,5	60 ± 0,5	16 56
24	12- 108	12 ± 0,5	108 ± 1,0	16 98
36	12- 156	12 ± 0,5	156 ± 1,0	16 140
48	12- 204	12 ± 0,5	204 ± 1,5	16 185
60	12- 252	12 ± 0,5	252 ± 2,0	16 240
72	12- 300	12 ± 0,5	300 ± 2,0	16 270
96	12- 408	12 ± 0,5	408 ± 3,0	16 240 394
132	12- 552	12 ± 0,5	552 ± 4,0	16 240 534
192	12- 804	12 ± 0,5	804 ± 6,0	16 394 770
252	12-1052	12 ± 0,5	1052 ± 8,0	16 534 1002
312	12-1300	12 ± 0,5	1296 ± 8,0	16 534 1248
432	12-1796	12 ± 0,5	1796 ± 12	16 534 1002 1730
612	12-2540	12 ± 0,5	2600 ± 20	16 770 1730 2438
792	12-3284	12 ± 0,5	3284 ± 25	16 1002 2438 3150
972	12-4028	12 ± 0,5	4100 ± 30	16 1002 2438 3886
1092	12-4892	12 ± 0,5	4892 ± 40	70 1002 2438 4650
1332	12-5884	12 ± 0,5	5884 ± 50	70 1002 3150 4650 5340
1872	12-8120	12 ± 0,5	8160 ± 75	70 1002 3150 5340 7600

(1) Voir également le point 6.1 du présent Avis.

TABLEAU II

Fréquence centrale f_c (kHz)	Largeur de bande (kHz) par rapport à f_c, dans laquelle l'atténuation devrait être au moins égale à:(1)				Largeur de bande (kHz) par rapport à f_c, en dehors de laquelle l'atténuation ne devrait pas dépasser:	
	70 dB	55 dB	30 dB	3 dB (2)	3 dB	0,5 dB
16	± 1,5	± 2,1	± 2,7	—	± 5	± 7
56	± 1,5	± 1,8 (3)	± 2,1 (3)	—	± 5	± 10
70	± 1,5	± 2,2	± 3,5	—	± 12	± 18
70 (4)	± 1,5	± 1,7	± 2,0	—	± 5	± 10
98	± 1,5	± 1,8	± 2,1	—	± 4	± 9
140	± 1,5	± 1,8	± 2,2	—	± 5	± 14
185	± 1,5	± 1,8	± 2,2	—	± 5	± 17
240	± 1,5	± 1,8	± 2,2	—	± 5	± 21
270	± 1,5	± 2,3	± 2,9	—	± 8	± 24
394	± 1,5	± 3,0	± 4,5	—	± 11	± 35
534	± 1,5	± 3,5	± 7,0	—	± 15	± 48
770	± 1,5	± 3,8	± 8,0	—	± 21	± 70
1002	± 1,5	± 4,0	± 9,0	—	± 27	± 90
1248	± 1,5	± 4,0	± 11,0	—	± 35	± 110
1730	± 1,5	± 4,2	± 14,0	—	± 48	± 155
2438	± 1,5	± 4,5	± 19,0	—	± 60	± 220
3150	± 1,5	± 9,0	± 22,0	—	± 85	± 285
3886 (5)	± 1,5	± 15,0	± 30,0	—	± 110	± 350
		± 1,8	± 3,5	± 8,0	± 12	± 100
4650	± 1,5	± 2,0	± 3,8	± 8,5	± 13	± 120
5340	± 1,5	± 2,2	± 4,0	± 8,5	± 14	± 150
7600	± 1,5	± 2,4	± 4,6	± 9,5	± 16	± 200

(1) Les valeurs de discrimination indiquées sont des valeurs relatives rapportées à l'affaiblissement minimal des filtres coupe-bande à l'intérieur de la bande de fréquences de base définie par les filtres passe-haut et passe-bas dans le Tableau I.

(2) Nouvelle colonne (à 3 dB), tirée de l'Avis G. 228 du CCITT.

(3) Les valeurs adoptées lors de la Réunion finale de la Commission d'études 4 étaient: ± 2,0 (55 dB) et ± 2,5 (30 dB).

(4) Nouveau filtre coupe-bande, d'après l'Avis G. 230 du CCITT.

(5) Les caractéristiques recommandées pour les filtres de 16 kHz à 3150 kHz inclusivement sont établies pour des filtres du type à inductance et capacité. Les caractéristiques recommandées pour les filtres à 4650 kHz (et fréquences plus élevées) supposent l'emploi de filtres à quartz. Des caractéristiques facultatives sont recommandées pour le filtre à 3886 kHz, permettant de choisir soit le filtre à inductance et capacité (ligne supérieure), soit le filtre à quartz (ligne inférieure).
La sélectivité du récepteur à 3886 kHz devrait être adaptée aux caractéristiques du filtre coupe-bande de type à quartz. Il est suggéré que cette sélectivité, dans la gamme de 3150 à 7600 kHz, soit déterminée en fonction des caractéristiques de filtres coupe-bande de type à quartz.

AVIS 579

OBJECTIF DE DISPONIBILITÉ D'UN CIRCUIT FICTIF DE RÉFÉRENCE ET D'UN CONDUIT NUMÉRIQUE FICTIF DE RÉFÉRENCE POUR LA TÉLÉPHONIE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 24/4)

(1982)

Le CCIR

CONSIDÉRANT

a) que le circuit fictif de référence et le conduit numérique fictif de référence pour la téléphonie dans le service fixe par satellite sont destinés à servir de guide à ceux qui conçoivent et planifient les systèmes;

b) qu'il est souhaitable que l'on se conforme aux concepts, termes et définitions en rapport avec les études de fiabilité que fait la CMBD (Commission mixte CCITT/CCIR pour les bruits de circuits et la disponibilité);

c) que la disponibilité des équipements (station spatiale comprise) dépend de la fiabilité de cet équipement, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance, toutes grandeurs définies par la CMBD.

d) que la disponibilité d'un service est déterminée par les effets combinés de la disponibilité de l'équipement, des caractéristiques de propagation et de la capacité d'écoulement du trafic, toutes grandeurs définies par la CMBD;

e) qu'il est souhaitable de fixer des objectifs semblables en matière de disponibilité du service pour les systèmes en câble, les faisceaux hertziens et les systèmes du service fixe par satellite,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que la disponibilité d'un circuit ou conduit numérique du service fixe par satellite devrait être définie par l'expression:

$$A = \frac{\text{(durée requise)} - \text{(durée d'interruption)}}{\text{(durée requise)}} \times 100 \quad (\%) \qquad (1)$$

la «durée requise» étant définie comme celle pendant laquelle l'utilisateur veut que le circuit ou conduit numérique soit en état d'exécuter une fonction donnée et la «durée d'interruption» comme la durée cumulée des interruptions de ce circuit ou conduit numérique au cours de la durée requise;

2. que la disponibilité d'un circuit ou conduit numérique du service fixe par satellite due aux équipements (appelée par le CCITT «disponibilité des équipements» dans la définition 2.9 de l'Avis G.106) ne devrait pas être inférieure à 99,8% d'une année (valeur provisoire);

3. qu'une liaison du service fixe par satellite, définie entre les extrémités du circuit fictif ou conduit numérique de référence des Avis 352 et 521, devrait être considérée comme indisponible lorsque soit une ou plusieurs des conditions suivantes sont réalisées à l'une ou l'autre des extrémités de réception de cette liaison pendant plus de 10 s consécutives (valeur provisoire) (Note 6):

3.1 en transmission analogique, le signal utile entrant sur le circuit est reçu à l'autre extrémité avec un niveau inférieur d'au moins 10 dB à celui auquel on s'attendait;

3.2 en transmission numérique, le signal numérique est interrompu (c'est-à-dire) qu'il y a perte du verrouillage de trame ou perte du rythme);

3.3 en transmission analogique, la puissance de bruit non pondérée dans une voie téléphonique en un point de niveau relatif zéro, avec une durée d'intégration de 5 ms, est supérieure à 10^6 pW0;

3.4 en transmission numérique, le taux d'erreurs sur les bits dépasse 10^{-3};

4. que les Notes ci-dessous soient considérées comme faisant partie du présent Avis.

Note 1. – Il n'est pas tenu compte dans ce qui précède de la disponibilité des équipements de multiplexage.

Note 2. – La valeur de la disponibilité du circuit ou conduit numérique est un objectif de planification pour les systèmes du service fixe par satellite; elle ne doit être ni incluse dans les spécifications des systèmes ni utilisée pour les essais de réception.

Note 3. – La durée d'interruption due aux effets de la propagation n'est pas prise en considération dans le calcul de la disponibilité mentionnée au point 2 du présent Avis. La nécessité d'établir un Avis sur l'indisponibilité due aux caractéristiques de propagation est une question toujours à l'étude.

Note 4. – Des durées inférieures à 10 s (valeur provisoire) ne sont pas comptées dans la disponibilité du circuit ou conduit numérique. Ce sujet nécessite des études complémentaires.

Note 5. – Toutes les interruptions dues aux éclipses du Soleil et au brouillage par le Soleil doivent être comprises dans la durée d'interruption.

Note 6. – Les services chargés de la planification doivent indiquer leurs propres hypothèses concernant la moyenne des temps de bon fonctionnement, la moyenne des temps de rétablissement du service, les précautions prises contre les interruptions et les dégradations des performances des satellites (notamment l'utilisation de canaux de réserve et de systèmes de secours).

Note 7. – Les circuits ou conduits numériques du service fixe par satellite qui sont utilisés uniquement pour des réseaux nationaux peuvent ne pas être conformes aux dispositions du présent Avis.

RAPPORT 706-1

DISPONIBILITÉ DES CIRCUITS DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 24/4)

(1978-1982)

1. Introduction

Le présent Rapport examine différents aspects de la Question 24/4, notamment la manière d'appliquer la définition de la disponibilité au circuit fictif de référence (Avis 352 et 522) pour la téléphonie et la télévision dans le service fixe par satellite. Il suggère certaines idées ainsi que certains paramètres en se fondant sur des critères valables de disponibilité propres aux circuits de téléphonie et de télévision dans le service fixe par satellite.

On a tenu compte des notions de fiabilité et de disponibilité des systèmes de faisceaux hertziens de télévision et de téléphonie examinées dans le Rapport 445, pour obtenir, si possible, une certaine cohérence entre les considérations relatives aux faisceaux hertziens et celles qui intéressent le service fixe par satellite.

Le Rapport présente aussi les résultats de l'expérience pratique acquise dans plusieurs pays.

2. Définition de la disponibilité des circuits

2.1 *Application de la notion de disponibilité au service fixe par satellite*

Ainsi que le CCITT l'a définie dans son Avis G.106, la disponibilité d'un service comprend les effets combinés de la disponibilité de l'équipement, des caractéristiques de propagation et de la capacité d'écoulement du trafic. Dans le présent Rapport, seuls les deux premiers aspects seront pris en considération.

La disponibilité d'un circuit doit être définie entre les deux extrémités du circuit ou du conduit numérique fictif de référence (Avis 352 et 522).

La disponibilité des circuits dans le service fixe par satellite peut se déterminer à partir de la durée des interruptions. Il convient de donner cette définition sans tenir compte des dispositions particulières qui pourraient être adoptées pour tel ou tel système ou tel ou tel équipement, par exemple l'utilisation de satellites de réserve, d'antennes de station terrienne ou d'autres équipements redondants.

2.2 *Définition*

La disponibilité d'un circuit ou d'un conduit numérique du service fixe par satellite doit être définie par l'expression:

$$A = \frac{\text{(durée de fonctionnement nécessaire)} - \text{(durée d'interruption)}}{\text{(durée de fonctionnement nécessaire)}} \times 100 \quad (\%) \qquad (1)$$

où la durée de fonctionnement nécessaire est la durée pendant laquelle l'usager a besoin que le circuit ou le conduit numérique soit en état d'exécuter une fonction voulue, et la durée d'interruption est la durée cumulée des interruptions du circuit ou du conduit numérique pendant la durée de fonctionnement nécessaire.

3. Interruption

La disponibilité d'un circuit de téléphonie ou de télévision du service fixe par satellite est déterminée par les interruptions. Une interruption est une période pendant laquelle il y a disparition complète ou partielle du signal, un bruit excessif, une discontinuité ou une importante distorsion du signal. Il convient d'examiner plusieurs aspects:

- définition de ce qui constitue une interruption;
- description des aspects temporels, tels que la durée d'une interruption, l'intervalle entre interruptions successives, etc.;
- réponse à la question suivante, aux fins de spécification d'un objectif de disponibilité: l'objectif doit-il couvrir tous les types d'interruption ou, dans le sens contraire, quels sont les différents types d'interruption à ne pas inclure?

Dans le cas de la téléphonie, il faut tenir compte d'une interruption dans la détermination de la disponibilité, si cette interruption est la cause d'une coupure de la communication, nécessitant ensuite le rétablissement de cette communication. A titre provisoire, on considère que toute interruption d'un circuit de durée supérieure à 10 s rendra ce circuit indisponible.

3.1 *Caractéristiques des interruptions*

Les conséquences des interruptions peuvent aussi varier suivant qu'elles sont imprévues ou prévues.

Les caractéristiques qu'on peut être amené à définir pour les interruptions non prévues sont les suivantes:

- temps moyen entre interruptions, pour garantir que les interruptions de longue durée ne se produiront pas trop souvent;
- interruption totale pendant une longue période. Cela permettrait d'assurer une valeur minimale de disponibilité pour le système;
- durée moyenne d'interruption; cela permettrait d'éviter que la durée d'une interruption, au cas où celle-ci se produirait, soit trop longue;
- fréquence d'apparition (par exemple, mesurée sur une heure);
- temps total d'interruption pendant une période déterminée (par exemple, d'une année quelconque);
- durée statistique des brèves interruptions. Il peut donc être souhaitable de spécifier différents points de la loi de distribution statistique.

4. Causes des interruptions

Les principales causes d'interruption d'une liaison du service fixe par satellite sont les suivantes:

défaillance du satellite

- baisse temporaire des performances en période d'éclipse par exemple, ou lors de manœuvres de positionnement ou de stabilisation;
- commutation d'éléments redondants en cas de défaillance sur des sous-ensembles de répéteurs;
- arrêt brutal du satellite et utilisation d'un satellite de secours;

défaillance des stations terriennes

- défaillance ou dégradation de l'équipement radioélectrique;
- défaillance des équipements de commutation sur secours;
- défaillance du système d'alimentation;
- défaillance des équipements d'antenne ou du système de pointage sur le satellite;

influence de phénomènes naturels

- passage du Soleil ou de la Lune dans le faisceau d'antenne de la station terrienne de la liaison descendante;
- affaiblissement excessif et augmentation du bruit dû aux précipitations sur les trajets montants et descendants;
- dépolarisation due à la troposphère;

influence des brouillages

- bruit dépassant un certain niveau, causé par des brouillages;

influence de catastrophes naturelles

- dépointage d'antennes et détérioration importante de bâtiments de stations terriennes en cas de tremblement de terre ou désastre exceptionnel;

influence de l'activité humaine

- mauvaise conception de la logistique de maintenance et de réparation des sous-ensembles;
- erreurs du personnel d'exploitation, dues par exemple à une formation imparfaite.

5. Objectifs de disponibilité des circuits

Les objectifs provisoires indiqués pour la disponibilité des circuits dans l'Avis 579 sont compatibles avec les données figurant dans l'Annexe I. Il est nécessaire de poursuivre les études pour rendre ces objectifs définitifs. La nécessité d'effectuer des études complémentaires est soulignée dans le Programme d'études 24A/4. Dans l'examen des objectifs de disponibilité, il faut tenir compte du fait que les effets de la propagation sont plus gênants dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

6. Mesure de la disponibilité des circuits

Pour définir les objectifs de disponibilité, il convient de tenir compte des besoins des usagers et de la disponibilité des circuits actuellement obtenue dans le service fixe par satellite.

On trouvera à l'Annexe I des exemples de données mesurées concernant la disponibilité des circuits entre les points définis dans l'Avis 352 pour le circuit fictif de référence. Il serait souhaitable de rassembler de nouvelles données sur la disponibilité des circuits et une méthode est proposée ci-après pour effectuer ces mesures.

Disponibilité des circuits bidirectionnels

En pratique, il est difficile d'observer, dans une station terrienne quelconque, la durée précise d'une interruption dans les deux sens de transmission (les données concernant la station terrienne éloignée étant parfois difficiles à obtenir).

En conséquence, l'équation suivante est proposée pour la mesure de la disponibilité d'un circuit bidirectionnel préassigné:

$$A_B = \frac{T_S - 2\,(TA_U + TA_D + TA_{COM}) - T_{SAT}}{T_S} \times 100 \qquad (\%) \qquad (2)$$

où

T_S : durée de fonctionnement prévue;

TA_U, TA_D : durée cumulée des interruptions de circuit imputables aux facteurs agissant respectivement sur les liaisons montantes et descendantes des stations terriennes (à l'exception des interruptions imputables aux facteurs agissant dans le satellite et dans les portions communes de la liaison montante et de la liaison descendante);

TA_{COM} : durée cumulée des interruptions de circuit imputables aux facteurs agissant respectivement dans les portions communes des liaisons montantes et descendantes de la station terrienne (à l'exception des interruptions dues aux défaillances du satellite);

T_{SAT} : durée cumulée des interruptions de circuit imputables aux défaillances du satellite.

La formule (2) ci-dessus implique que les durées totales des interruptions de circuit imputables aux facteurs agissant sur la liaison montante ou la liaison descendante des stations terriennes aux deux extrémités de la liaison sont égales. Elle implique aussi que les facteurs applicables aux portions communes des deux liaisons sont identiques.

Note 1. – Si plusieurs éléments interviennent simultanément, il y a lieu de tenir compte de la durée correspondant à un seul de ces éléments.

En utilisant cette formule, on pourra estimer la valeur moyenne et la distribution de la disponibilité des circuits dans un réseau à satellite à partir des valeurs de A_B rassemblées dans de nombreuses stations terriennes comprises dans le réseau.

Note 2. – Pour les systèmes à assignation en fonction de la demande, il pourrait être nécessaire d'étudier plus en détail les principes de la disponibilité.

ANNEXE I

D'après des contributions présentées par certaines administrations à titre de réponse partielle à la Question 24/4 (§ 3 du dispositif), la présente Annexe expose des exemples de disponibilité de circuit et indique des méthodes que l'on peut utiliser pour le rassemblement des données.

1. Exemples de disponibilité de circuits

1.1 *Exemple 1*

La Fig. 1 donne des exemples de cette disponibilité calculée sur une base annuelle. Ce calcul a été fait par application de la formule (2) du § 6 à des données recueillies de 1971 à 1975 dans une station terrienne existante assurant des communications internationales par satellite. Cette figure donne la valeur moyenne de la disponibilité des circuits, cette moyenne étant prise sur huit circuits téléphoniques bidirectionnels. La Fig. 2 représente, sur une base annuelle, les pourcentages du temps correspondant aux principales causes d'interruption des circuits: ces résultats ont été fournis par des observations faites dans une station terrienne. La Fig. 3 représente la disponibilité de circuits pour les principales causes d'interruption.

Il convient de noter que cette disponibilité n'est pas défavorablement influencée par des interruptions dues aux effets de la propagation.

Pour le calcul de cette disponibilité, on fait les hypothèses suivantes:

- tous les circuits assurent un service à plein temps. De ce fait, la somme de la durée de fonctionnement et de la durée d'interruption est égale au temps total écoulé (ici, une année);
- une interruption de circuit est un état dans lequel le rapport signal/bruit non pondéré est inférieur à 30 dB pendant au moins 10 secondes.

La station terrienne considérée est caractérisée par une redondance de 1 : 1, sauf pour l'antenne.

Une interruption de circuit imputable à la commutation sur un satellite de réserve est classée dans la catégorie «Indéterminé» et non dans la catégorie «Satellite».

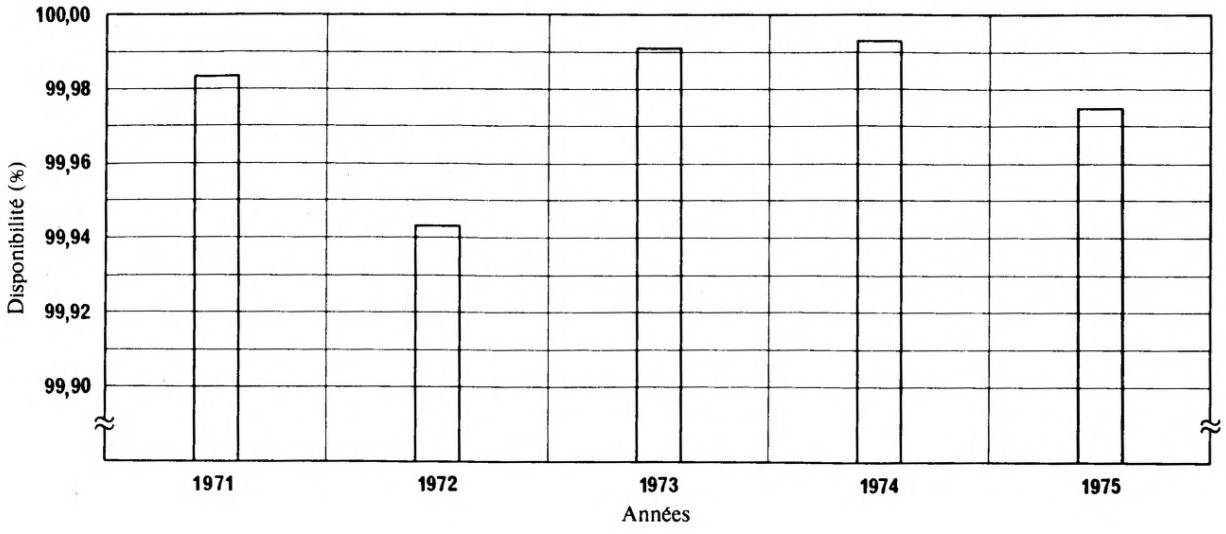


FIGURE 1 — *Exemple de disponibilité de circuits*

Note. — Les équipements de la station terrienne ont été remplacés par de nouveaux équipements à la fin de l'année 1971.

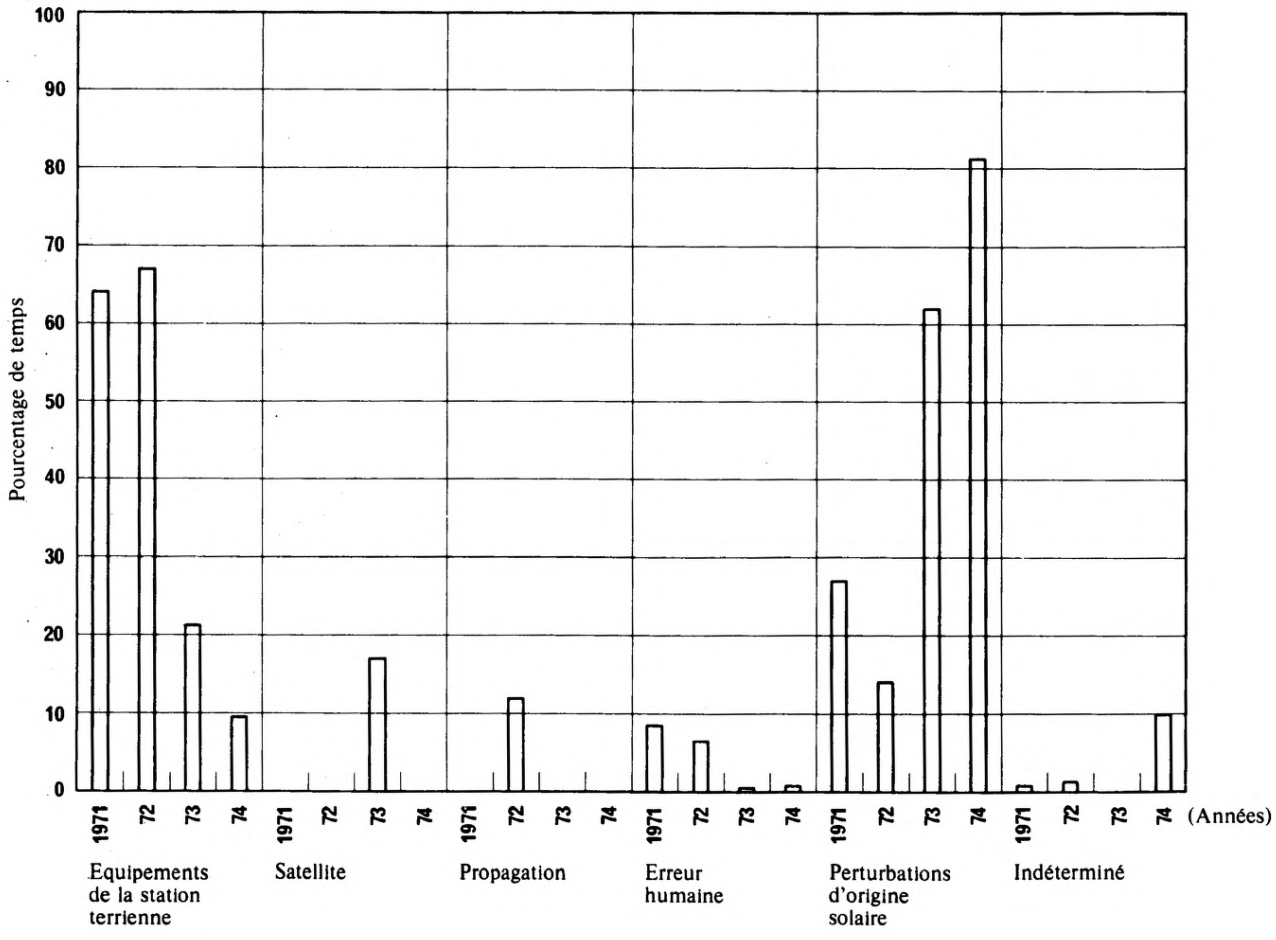


FIGURE 2 — *Répartition en pourcentage de temps entre les principales causes d'interruption des circuits (par année)*

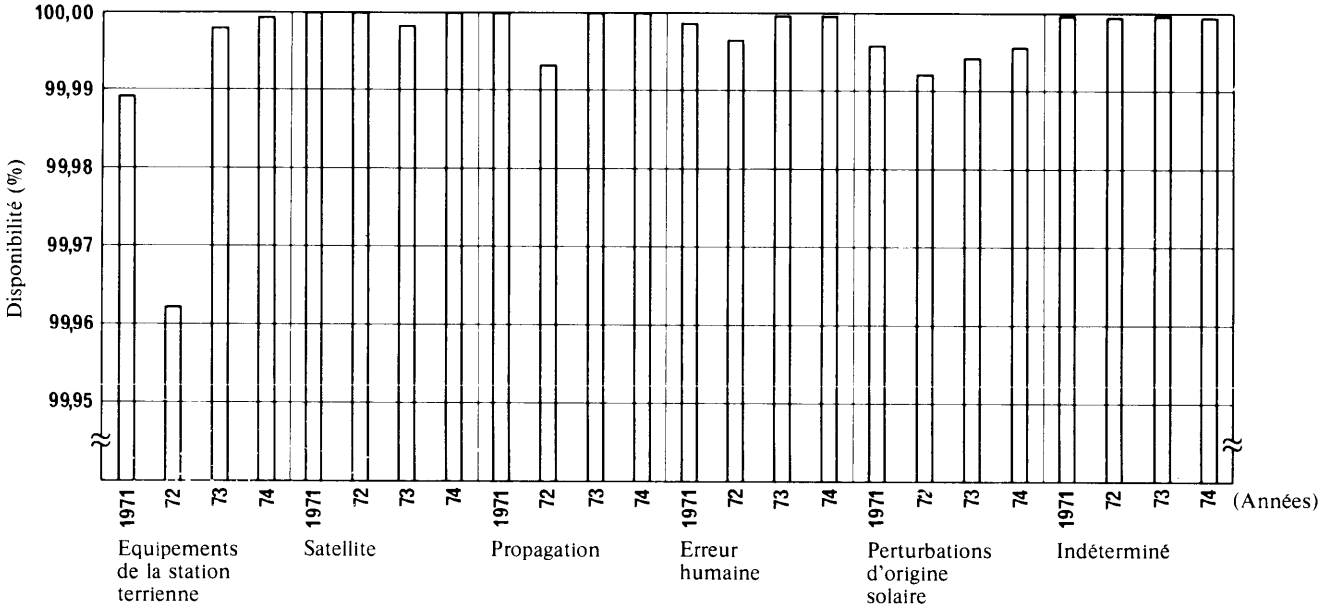


FIGURE 3 — *Disponibilité des circuits compte tenu des principales causes d'interruption*

1.2 *Exemple 2*

Les valeurs obtenues depuis 1971 pour la disponibilité moyenne des circuits station-satellite-station dans le système INTELSAT sont les suivantes:

Année	*Disponibilité*
1971	99,812%
1972	99,870%
1973	99,875%
1974	99,888%
1975	99,892%
1976	99,876%
1977	99,904%
1978	99,877%
1979	99,893%
1980	99,894%

Note. – Ces chiffres ont été obtenus par application d'une formule différente de la formule (2). D'une manière générale, on s'attend à voir une bonne corrélation entre les résultats fournis par les deux méthodes.

1.3 *Exemple 3*

Un système national de télécommunication par satellite comportant sept stations terriennes dont les caractéristiques sont semblables à celles des stations INTELSAT classe A a atteint une disponibilité supérieure à 99,99% calculée conformément à l'expression (1) du Rapport 706. La disponibilité des circuits porte sur les années allant de 1973 à 1980.

Il convient de faire observer que toutes les stations sont équipées d'antennes de réserve et d'équipement de communication au sol de réserve. Grâce à cela et à la présence d'un satellite de réserve sur orbite, on a pu éliminer complètement les interruptions dues au brouillage d'origine solaire. L'équipement de communication au sol de réserve sert également à remplacer un équipement défaillant, ce qui diminue encore la durée des interruptions dues aux défaillances du matériel.

2. Effets de la station terrienne sur la disponibilité des circuits

Les installations de station terrienne ont d'importantes répercussions sur la disponibilité des circuits. A titre d'exemple, le Tableau I donne des indications sur le nombre et la durée des interruptions dues aux pannes des installations et aux brouillages causés par le Soleil dans une station terrienne fonctionnant dans un système mondial à satellites, pendant une période de trois ans qui comprend la première année d'exploitation.

La présentation de ces données satisfait aux critères énoncés dans l'Annexe II, à cette exception près que, au lieu de la norme de 10^6 pW, il convient d'utiliser une puissance de bruit non pondéré de 700 000 pW en un point de niveau relatif zéro pour définir une interruption.

A partir de ces données, on a calculé la disponibilité des circuits, compte tenu de l'influence d'une station terrienne à une extrémité d'un circuit fictif de référence, en utilisant la définition figurant dans le § 2.2.

Le Tableau II contient des données de disponibilité relatives à plusieurs stations terriennes du système INTELSAT, pour la période d'exploitation de 1972 à 1976, ainsi que la disponibilité moyenne des stations terriennes de l'ensemble du système INTELSAT.

TABLEAU I

Origine des interruptions	Année	Durée des interruptions (minutes)	Disponibilité (%)	Nombre d'interruptions	Pourcentage de la durée totale des interruptions
A	1974 1975 1976	0 63,6 0	100 99,988 100	0 8 0	0 56,2 0
H	1974 1975 1976	7,5 10,5 8,5	99,999 99,998 99,998	3 3 5	3,4 9,3 26,2
P	1974 1975 1976	189 21 18	99,964 99,996 99,996	10 5 2	86,3 18,6 55,4
O	1974 1975 1976	0 1 0	100 99,999 100	0 1 0	0 0,9 0
U	1974 1975 1976	0,5 0 0	99,999 100 100	1 0 0	0,2 0 0
L	1974 1975 1976	6 0 0	99,999 100 100	1 0 0	2,8 0 0
S	1974 1975 1976	16 13 5	99,997 99,997 99,999	4 4 2	7,3 11,5 15,4
GCE	1974 1975 1976	0 4 1	100 99,999 99,999	0 1 1	0 3,5 3,0
Total	1974 1975 1976	219 113 32,5	99,958 99,978 99,994	19 22 10	100 100 100

A: Antenne et poursuite
H: Amplificateur de puissance
P: Sous-système d'alimentation en énergie
O: Diverses
L: Amplificateur à faible bruit
S: Brouillage causé par le Soleil
GCE: Equipement de télécommunication au sol
U: Inconnue

TABLEAU II

Année / Station terrienne	1972	1973	1974	1975	1976
1	99,921	99,841	99,533	99,937	99,996
2	—	99,994	99,997	99,960	99,997
3	—	99,86	99,87	99,96	—
4	—	99,93	99,87	99,76	—
5	—	99,92	99,93	99,88	—
6	—	—	99,958	99,978	99,994
Moyenne INTELSAT	99,86	99,88	99,90	99,91	99,88 (1)

(1) Ne comprend que les données statistiques rassemblées jusqu'en octobre 1976.

Note. – Les périodes de mesure figurant au Tableau II pour les diverses stations terriennes commençaient en des mois différents de l'année.

RAPPORT 553-2

EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 20/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

En plus d'une bonne organisation pour l'exploitation et la maintenance des stations terriennes du service fixe par satellite, certaines installations techniques sont nécessaires pour le réglage et la maintenance des liaisons par satellite et des équipements de télécommunication installés dans les stations terriennes.

Pour faire les mesures nécessaires sur les liaisons par satellite à une ou plusieurs destinations, une étroite collaboration entre les stations terriennes est nécessaire. Des mesures complètes d'extrémité à extrémité doivent être faites lorsque les liaisons sont mises en place et aussi pendant l'exploitation du système.

Les installations techniques dont il est question ci-dessus comprennent des appareils de mesure et d'essai dont les caractéristiques de fonctionnement doivent répondre aux conditions d'exploitation et aux objectifs de qualité spécifiés pour les systèmes du service fixe par satellite considérés.

Pour des raisons d'économie, il est souhaitable de concevoir des stations terriennes fonctionnant sans personnel technique de surveillance pendant des périodes allant de quelques heures par jour à plusieurs mois. De telles stations terriennes sont déjà en exploitation dans des réseaux régionaux.

2. Compatibilité des équipements

Pour que l'on puisse faire les mesures avec la précision requise puis les interpréter et les comparer correctement, il faut que toutes les stations terriennes faisant partie d'un même système soient pourvues d'appareils de mesure compatibles. En outre, dans certains cas particuliers, par exemple lorsqu'une porteuse ne peut pas être reçue du satellite sur un trajet en boucle, il serait très utile de disposer d'un «système automatique de retransmission» des résultats des essais, ce qui nécessiterait aussi la compatibilité des méthodes et des équipements.

Pour assurer cette compatibilité, on a spécifié, dans certains cas, les caractéristiques des appareils d'essai dans les Avis du CCIR et du CCITT (par exemple, l'Avis 482). D'autres appareils ont également été adoptés à l'échelle internationale, comme c'est le cas, par exemple, pour des analyseurs de liaisons hyperfréquences utilisés dans le système INTELSAT. En outre, mention est faite de la Publication 510 de la CEI, dans laquelle sont définies des méthodes de mesure applicables à des stations terriennes.

Il est important que les documents techniques soient transmis par les administrations pour que les meilleures spécifications possibles, fondées sur des considérations économiques et techniques, puissent être établies; l'Annexe I indique, par exemple, les raisons qui ont motivé la spécification des filtres décrits dans l'Avis 482 et l'Annexe II porte sur la compatibilité des procédures et des équipements de mesure des paramètres de transmission en fréquence intermédiaire et en bande de base.

3. Utilisation des équipements

L'acquisition et le stockage des appareils d'essai dans les stations terriennes pourraient être simplifiés s'il était possible de limiter au minimum le nombre des appareils nécessaires. En conséquence, on peut envisager l'utilisation d'équipements à buts et à gammes multiples en tenant soigneusement compte de leurs caractéristiques de fiabilité et de disponibilité. Si l'on considère, par exemple, le cas des appareils d'essai de télévision utilisés dans les liaisons intercontinentales du service fixe par satellite, il est souhaitable que ces appareils puissent servir à des mesures sur les systèmes de télévision en noir et blanc 525/60 et 625/50 ainsi que sur les systèmes de télévision en couleur 525/60 NTSC, 625/50 PAL ou 625/50 SECAM.

L'utilisation optimale des appareils d'essai dans les stations terriennes serait assurée si leur acquisition se faisait sur la base de spécifications uniformes adoptées à l'échelle internationale. Cela éviterait des investissements importants dans des équipements d'essai qui risquent d'être périmés après une courte période d'utilisation.

4. Equipement automatique d'essai

En raison du développement des systèmes, il est permis de penser que, compte tenu du grand nombre des mesures nécessaires pour faciliter leur exploitation, il faudra disposer d'appareils permettant:

- de diminuer considérablement la durée des mesures;
- de diminuer notablement les erreurs de manipulation pendant les mesures;
- de nécessiter un minimum de commande manuelle.

En conséquence, les appareils d'essai automatiques sont destinés à prendre une importance croissante dans les stations terriennes du service fixe par satellite puisqu'ils sont normalement adaptés aussi bien au fonctionnement automatique qu'au fonctionnement manuel.

Il devrait être possible que ces appareils d'essai soient transportés et utilisés par le personnel technique pour effectuer les opérations de maintenance régulière des stations exploitées sans surveillance.

5. Liste des équipements

Pour ce qui concerne les systèmes MRF-MF-AMRF, les listes types d'équipement ont été établies pour certains systèmes [INTELSAT, 1971].

6. Conception de stations terriennes exploitées sans surveillance

Une façon d'aborder la conception de stations terriennes exploitées sans surveillance est de:

- concevoir dès l'origine les équipements pour respecter les caractéristiques nominales en fonctionnement normal sans introduction de chaîne redondante en réserve passive;
- veiller à ce qu'une panne sur un élément quelconque d'un sous-ensemble quelconque ne conduise pas à un arrêt total de la fonction de ce sous-ensemble, mais seulement à une dégradation de ses caractéristiques;
- classer certains paramètres de manière telle que la continuité du service soit assurée malgré les défaillances pouvant se produire sur certains sous-ensembles;
- réduire au minimum les organes de commande et de contrôle et les concevoir de telle manière qu'ils aient une fiabilité bien supérieure à celle des éléments courants de la station.

La quantité et le type des organes de commande et de contrôle entrant dans la constitution d'une station exploitée sans surveillance devraient résulter de l'analyse des objectifs de disponibilité et de qualité de service requis.

Guillarme et Pénicaud [1975], Lombard et Viana, [1972] suggèrent des modifications qu'il est possible d'apporter à certains paramètres de transmission pour assurer la continuité du service en présence d'équipements défaillants, tandis que Plottin, [1975] donne un aperçu des méthodes qui peuvent être mises en œuvre pour la détection des défauts, l'élaboration des commandes et la surveillance à distance des caractéristiques essentielles de transmission.

Si une petite station terrienne sans surveillance ne dispose pas d'un équipement indépendant pour la transmission de signaux de surveillance à destination ou en provenance d'une station centrale, la liaison par satellite proprement dite peut être utilisée pour la surveillance et la télécommande de la station à partir de la station centrale à l'aide d'une voie téléphonique de temps en temps. Du point de vue technique cela ne pose pas de problèmes importants, mais les exigences d'une disponibilité élevée peuvent imposer la redondance de toutes les unités fonctionnelles essentielles et la commutation automatique sur une voie de secours en cas de défaillance.

Le système de contrôle et de commande conçu pour le réseau de stations terriennes intra-entreprise du système TELECOM-1 en est un exemple. Ces stations terriennes seront installées au voisinage immédiat des locaux de l'utilisateur et seront exploitées sans personnel, avec une surveillance à distance par des centres régionaux. Une station terrienne comporte un dispositif de gestion locale comprenant un microprocesseur assisté par des unités de mémoire appropriées permettant d'extraire les paramètres de gestion nécessaires et de les afficher localement ou à distance dans un centre de gestion (par exemple: puissance d'entrée et de sortie des amplificateurs à grande puissance, alarmes, position marche/arrêt de l'équipement, taux d'erreur sur les bits, etc.). Le centre de gestion est équipé d'un mini-ordinateur qui emmagasine et traite les données sur la situation des stations qu'il contrôle et produit des données logistiques pour la maintenance et l'exploitation de la station. Ces équipements de gestion permettent l'installation de réseaux comprenant un grand nombre de stations terriennes sans personnel et les économies importantes réalisées dans les coûts d'exploitation compensent largement les dépenses supplémentaires qu'entraîne leur mise en place dans les stations terriennes.

Les systèmes modernes de contrôle des émissions utilisant des techniques de micro-ordinateur offrent une possibilité de contrôle permanent ou temporaire des stations terriennes non surveillées à partir d'une station maîtresse centrale. L'expérience acquise avec les stations RAISTING 4 et 5 et d'USINGEN 1 a montré que les systèmes de contrôle à plusieurs niveaux assistés par micro-ordinateur sont particulièrement appropriés à cet usage. La conception modulaire d'un système à 3 niveaux, par exemple, assure une souplesse suffisante pour l'adaptation aux exigences d'exploitation et permet une répartition raisonnable de tâches entre le centre et les stations terriennes associées.

Les fonctions que les différents niveaux peuvent assurer sont les suivantes:

Le premier niveau est le niveau équipement. Il émet des alarmes et des rapports sur l'état de fonctionnement, fournit les instructions de commutation et de réglage et reçoit les demandes sur l'état de fonctionnement.

Le deuxième niveau est celui de la station terrienne. A ce niveau, des renseignements plus détaillés sur l'état de fonctionnement sont extraits des rapports concernant des équipements particuliers et sont évalués. Les alarmes ou les changements d'état se rapportant à l'équipement sont enregistrés à ce niveau sur une imprimante.

Le troisième niveau est celui de la station centrale de télécommande de plusieurs stations terriennes associées. Il revient à cette station de surveiller les services (relations de trafic) assurés par les liaisons par satellite et d'effectuer d'autres tâches se prêtant à un traitement centralisé (commutation de service, par exemple). La commutation des équipements ou les instructions de commande peuvent aussi être assurées à ce niveau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GUILLARME, P. et PENICAUD, E. [11-13 novembre 1975] Organisation d'un module d'interface AMRT à accès numérique réalisant la concentration de circuits par interpolation de la parole. Troisième Colloque international sur les télécommunications numériques par satellite. Kyoto, Japon.

INTELSAT [1971] Satellite system operations guide. Vol. II.

LOMBARD, D. et VIANA, O. [28-30 novembre 1972] Concentration de la parole et accès multiple. Deuxième Colloque international sur les télécommunications numériques par satellite. Paris, France.

PLOTTIN, G. [1975] Systèmes de réception à faible bruit et d'amplification de puissance pour stations terriennes sans surveillance. *Rev. des Télécomm.* **50**, 160.

ANNEXE I

CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES DES FILTRES POUR LA MESURE DE LA QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT A L'AIDE DE SIGNAUX D'ESSAI A BRUIT BLANC

Lorsqu'on étudie les caractéristiques des filtres utilisés pour la mesure de la qualité de fonctionnement à l'aide d'un bruit blanc, il faut tenir compte de deux facteurs principaux:

- la fréquence centrale,
- les caractéristiques de largeur de bande.

1. Lorsqu'on choisit la fréquence centrale, il faut s'assurer qu'une fréquence appropriée à la capacité de la voie considérée est déjà largement utilisée.

Par exemple, dans le cas de l'Avis 482 les fréquences centrales ont été déterminées d'après l'Annexe 1 à la Question 8/C de la CMBD (CCITT/CCIR), d'après l'Avis 399 du CCIR et d'après différents documents de l'INTELSAT.

Lorsqu'il faut choisir des fréquences centrales qui n'ont pas encore fait l'objet de spécifications, les fréquences préférées doivent être celles qui peuvent être utilisées pour le plus grand nombre possible de valeurs de la capacité en voies. Si une nouvelle fréquence supérieure de mesure est nécessaire et si aucune n'est recommandée dans la gamme comprise entre 90% et 96,5% de la fréquence de coupure effective, il faut choisir une fréquence de mesure égale à environ 95% de la fréquence de coupure du filtre passe-bas.

2. Lorsqu'on spécifie les caractéristiques de largeur de bande des nouveaux filtres, il faut faire un choix entre les filtres LC et les filtres à quartz. Aux fréquences supérieures à 3886 kHz, il semble souhaitable d'utiliser des filtres à quartz.

La Fig. 1 indique la largeur de bande (± kHz) des divers filtres coupe-bande qui figurent dans le Tableau II de l'Avis 482. La Fig. 1 montre que l'on peut relier les diverses valeurs à l'aide d'un jeu de courbes qui permettent de lire directement, sur le graphique, les caractéristiques de coupure de tout filtre nouveau. Par exemple, le tracé d'une ligne verticale à partir de la fréquence centrale d'un filtre à 185 kHz produira des intersections aux points suivants de la largeur de bande: ± 17, ± 5, ± 2,2, ± 1,8 et ± 1,5 kHz. Ces valeurs sont indiquées de droite à gauche dans le Tableau II.

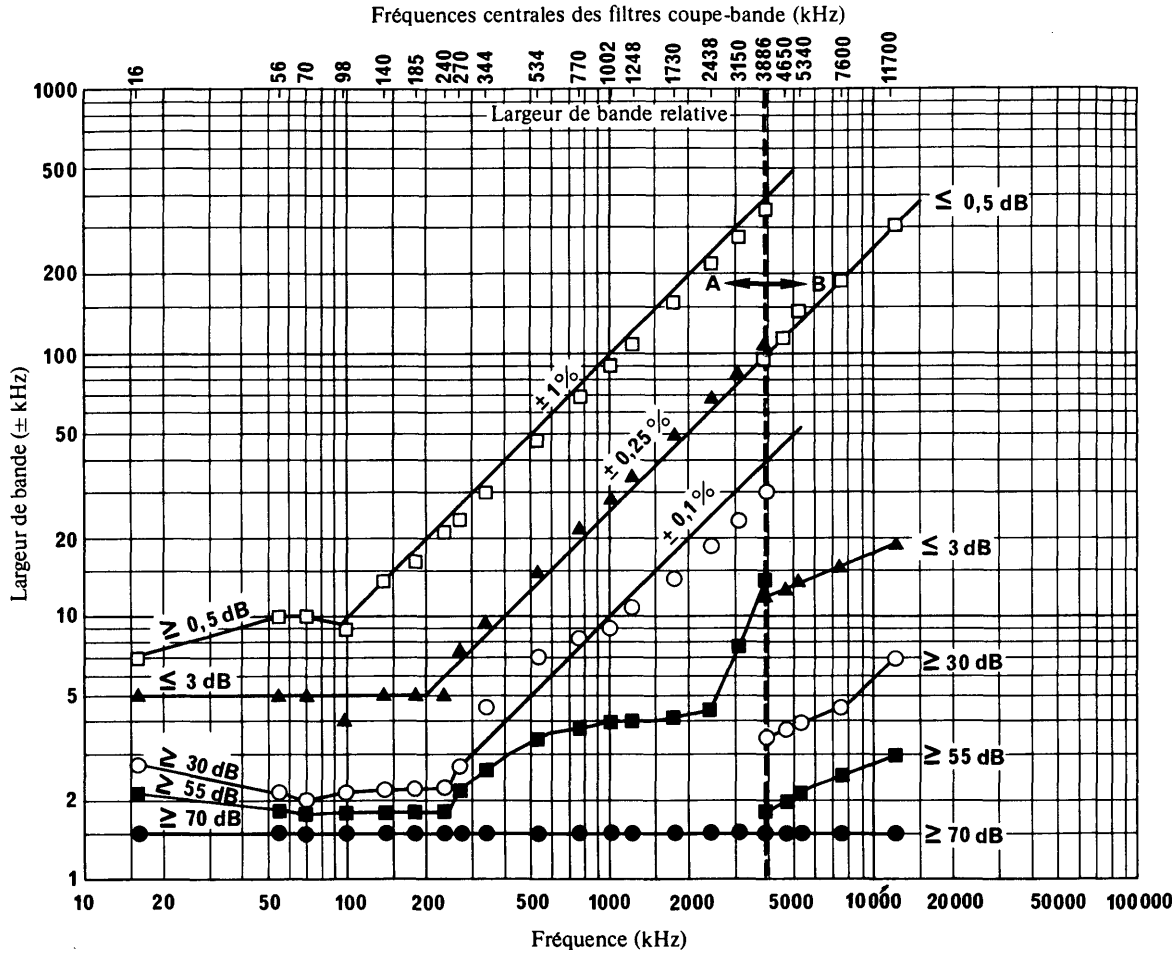


FIGURE 1 — *Largeur de bande (± kHz) des filtres coupe-bande figurant dans le Tableau II de l'Avis 482*

A: Filtres à inductance et capacité
B: Filtres à quartz

ANNEXE II

COMPATIBILITÉ DES PROCÉDURES ET DES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS POUR LES MESURES DES PARAMÈTRES D'ÉMISSION AU NIVEAU DES FRÉQUENCES INTERMÉDIAIRES ET DE LA BANDE DE BASE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

1. Introduction

Il est nécessaire de mesurer les paramètres de transmission ou les distorsions des composantes et des systèmes de transmission dans leur totalité, ces derniers consistant en une liaison de mesures avec un ou plusieurs satellites. Cela signifie que l'équipement de mesure utilisé à cette fin et produit par différents constructeurs doit être compatible en ce qui concerne les procédures de mesure et les paramètres importants tels que des fréquences.

2. Compatibilité des procédures de mesures

Le Sous-Comité 12E de la CEI s'est efforcé de normaliser les procédures de mesure à tous les niveaux de fréquences en cause: bande de base, fréquences intermédiaires et radioélectriques.

La Publication 510 de la CEI décrit les méthodes de mesure pour les équipements radioélectriques utilisés dans les stations terriennes de télécommunication par satellites et la Publication 487 de la CEI concerne les méthodes de mesure applicables au matériel utilisé pour les faisceaux hertziens de Terre. Ces publications définissent les mêmes procédures de mesure pour chacun des deux groupes d'utilisateurs assurant ainsi la compatibilité de ces procédures.

3. Compatibilité des fréquences

Les méthodes de mesure de distorsion citées plus haut font appel à une basse fréquence de balayage f_S et à plusieurs hautes fréquences de modulation f_M. Les mesures à effectuer sur les liaisons ne peuvent être exécutées que si l'émetteur et le récepteur ont la même fréquence de balayage et la même fréquence de modulation.

3.1 *Normes existantes*

Pour les régions desservies par le système INTELSAT, la compatibilité des équipements de mesure provenant de constructeurs différents a été assurée par les définitions indiquées ci-après dans le Tableau I.

TABLEAU I – *Fréquences INTELSAT*

Fréquence	Valeur	Tolérance	Paramètres mesurés
Fréquence de balayage	18 Hz	±5%	–
Fréquence de modulation	92,5926 kHz 277,778 kHz	$\pm 20 \times 10^{-6}$ $\pm 20 \times 10^{-6}$	Non-linéarité et distorsion de retard de groupe

Les fréquences de sous-porteuse de chrominance utilisées habituellement ont été acceptées par INTELSAT.

La fréquence centrale utilisée pour les mesures au niveau FI est 70 MHz.

Après utilisation de plusieurs générations d'équipement de mesure pour les faisceaux hertziens, certaines fréquence de mesure ont été retenues et il serait utile d'appliquer ces fréquences aux systèmes de télécommunications par satellite. Les valeurs préférées sont indiquées dans le Tableau II.

TABLEAU II – *Fréquences de mesure applicables aux systèmes de Terre*

Fréquence de balayage	Fréquences de modulation	Fréquences intermédiaires centrales
70 Hz	83,333; 250; 500 kHz 2,4; 5,6; 8,2; 12,39 MHz 3,58 ou 4,43 MHz (facultatif)	35; 70; 140 MHz

3.2 *Extension des normes de fréquences existantes*

Alors que l'on dispose d'un nombre suffisant de fréquences de modulation pour les faisceaux hertziens de Terre, on constate deux besoins additionnels en fréquences pour les liaisons par satellite, à savoir:

- des fréquences de modulation élevées pour les mesures de la phase différentielle et du gain différentiel,
- une fréquence de modulation faible, inférieure à 60 kHz pour les mesures des distorsions non linéaires et des distorsions de phase des systèmes récents comportant 12 canaux.

Les valeurs préférées proposées pour les systèmes à satellites sont indiquées au Tableau III.

TABLEAU III – *Fréquences proposées d'après le système INTELSAT et fréquences supplémentaires d'après le Tableau II*

Fréquence	Valeur	Tolérance	Paramètres mesurés
Fréquence de balayage	18 Hz, 70 Hz	± 5%	–
Fréquences de modulation	55,5556 kHz 92,5926 kHz 277,778 kHz	$\pm 20 \times 10^{-6}$ $\pm 20 \times 10^{-6}$ $\pm 20 \times 10^{-6}$	Non-linéarité et distorsion de retard de groupe
Fréquences de modulation optionnelles	3,58 MHz 4,43 MHz 8,2 MHz	$\pm 20 \times 10^{-6}$ $\pm 20 \times 10^{-6}$ $\pm 20 \times 10^{-6}$	Phase différentielle et gain différentiel

On remarque que pour les systèmes à bande très étroite, il est commode d'utiliser des fractions entières de fréquences de modulation déjà définies.

Il se peut qu'une fréquence intermédiaire plus élevée soit nécessaire pour les largeurs de bande de répéteur dépassant 36 MHz. A cet effet, il semble qu'il serait commode d'utiliser la fréquence 140 MHz définie dans l'Avis 403.

RAPPORT 707-1

CARACTÉRISTIQUES DES JONCTIONS NUMÉRIQUES ENTRE RÉSEAUX A SATELLITE ET RÉSEAUX DE TERRE

(Programme d'études 2N/4)

(1978-1982)

1. Introduction

Le présent Rapport traite des points du Programme d'études 2N/4 concernant les problèmes des liaisons numériques internationales (équipement de jonction numérique directe, EJND) entre pays dont les réseaux de Terre sont composés de sections analogiques et de sections numériques. Le Rapport a aussi pour objet d'étudier certains aspects concernant la transmission de la signalisation et la surveillance de l'équipement de multiplexage MIC de la liaison. La préférence est donnée à l'interface plésiochrone entre liaisons de Terre et liaisons par satellite, mais on envisage aussi une solution comportant la justification de la liaison par satellite lorsqu'une interface plésiochrone peut ne pas être possible.

2. Exposé du problème

L'introduction des techniques de transmissions numériques dans les réseaux du service fixe par satellite devrait se généraliser dans les prochaines années car elles permettent une bien meilleure efficacité d'utilisation des satellites que les systèmes analogiques employés actuellement. En contrepartie, la mise en service de liaisons

numériques par satellite est susceptible de créer de nouveaux problèmes de raccordement avec les réseaux de Terre; la majorité de ceux-ci sont en effet analogiques, d'où la nécessité de prévoir une conversion analogique-numérique. Au Centre international de transit (CT), les fonctions de commutation sont effectuées au niveau de la voie. Il semble donc approprié d'y installer également des équipements de conversion analogique-numérique. Cela montre clairement qu'il serait le plus souvent avantageux de prolonger les liaisons numériques par satellite en utilisant des liaisons numériques de Terre au moins jusqu'aux centres internationaux de transit. En outre, cette disposition devrait faciliter l'intégration de cette liaison au réseau de Terre lors d'une numérisation ultérieure de ce réseau.

Lorsqu'il est souhaitable de maintenir des liaisons de Terre analogiques, on peut utiliser des transmultiplexeurs à la station terrienne pour effectuer la conversion analogique-numérique. On estime que les transmultiplexeurs seront un moyen économique et qu'ils donneront un meilleur résultat que la démodulation et le démultiplexage analogiques suivis du codage et du multiplexage numérique.

2.1 *Types de liaisons numériques internationales*

Il semble probable que les trois types de liaisons suivants puissent être utilisés lors de l'établissement de réseaux pour communications numériques internationales:

- une liaison de transmission numérique fondée sur des moyens de transmission MIC-MDP-AMRF à une seule voie par porteuse. En principe, une telle liaison fonctionnerait avec un débit binaire brut de 64 kbit/s pour la téléphonie ou la transmission de données. On pourrait aussi employer un taux de codage/décodage de 3/4 ou de 7/8 en cas de jonction avec le réseau de Terre, au débit binaire net de 48 ou de 56 kbit/s, si, pour la transmission de données, le taux d'erreur n'était pas satisfaisant.
- une liaison de transmission numérique essentiellement fondée sur des moyens de transmission MIC-MRT-MDP-AMRF multivoies, par exemple un équipement de multiplexage du premier ordre ou d'ordre supérieur avec MDP. Ce type de transmission peut écouler divers signaux, tels que ceux de téléphonie avec ou sans CNC (concentration numérique des conversations) ou ceux de transmission de données à grande vitesse.
- des liaisons de transmission numériques MIC-MDP-AMRT, dans lesquelles le débit binaire au cours d'une salve pourrait atteindre en principe 60 à 120 Mbit/s, alors que le débit d'information pour l'une quelconque des destinations serait plus faible. Pour ce type de transmission, les mouvements du satellite causeront une légère différence de débit entre les signaux émis et reçus.

2.2 *Types de réseaux*

La connexion internationale est nécessaire pour trois types de réseaux, ci-après étudiés par ordre chronologique.

2.2.1 *Réseaux analogiques*

Ils forment la majorité des réseaux existants et comprennent surtout des liaisons analogiques avec, toutefois, un nombre croissant de liaisons numériques. On admet malgré tout que, dans cette catégorie de réseaux, le Centre de commutation international de transit (CT) demeure analogique.

2.2.2 *Commutation numérique au CT, réseaux nationaux asynchrones*

Il s'agit probablement de la prochaine étape de l'introduction des techniques numériques dans les communications internationales. Il est possible qu'à ce stade le CT soit connecté à la station terrienne par des liaisons numériques.

2.2.3 *Réseaux nationaux synchrones interconnectés par des liaisons numériques*

Ils comporteront aussi des réseaux nationaux utilisant des horloges de grande stabilité, connectées selon le mode plésiochrone. On pense que ce sera la configuration finale des réseaux envisagée par le CCITT.

Il est à noter que les configurations fondées sur des combinaisons de ces réseaux doivent pouvoir coexister.

2.3 *Interconnexion de liaisons numériques dont les signaux sont assujettis à des horloges différentes*

Lorsqu'un signal numérique est transmis d'une liaison numérique à une deuxième liaison numérique, les horloges auxquelles sont assujetties la première et la deuxième liaison numérique peuvent présenter des décalages dans le temps qui doivent être compensés pour que l'information passe de la première à la deuxième liaison.

Deux méthodes peuvent être appliquées pour cette compensation et, par conséquent, pour l'interconnexion de liaisons numériques ayant des rythmes d'horloge différents. La première consiste à faire des glissements de trame c'est-à-dire, de temps en temps, sauter une trame ou transmettre une trame deux fois de suite, et la seconde fait appel à la justification.

Si l'on utilise la technique des glissements de trame, il faut fixer des limites à la fréquence des glissements de trame. En téléphonie MIC, plusieurs glissements par minute peuvent être tolérés, alors que certains types de services de données ne peuvent admettre plus d'un ou deux glissements par jour sur une connexion entre abonnés.

La fréquence des glissements étant proportionnelle à la différence de fréquence des horloges à travers l'interface, les horloges de la liaison indépendante doivent être maintenues dans des tolérances étroites de précision et de stabilité, de façon que les liaisons soient pratiquement synchrones. Une connexion entre deux réseaux ainsi maintenus en quasi-synchronisme est appelée connexion plésiochrone.

La seconde solution consiste à utiliser, sur la deuxième liaison, un débit binaire légèrement supérieur à celui du signal numérique initial. La différence est compensée par l'adjonction des bits de justification qui doivent être par la suite éliminés (déjustifiés) à l'extrémité de la deuxième liaison pour la rendre effectivement transparente, et le débit binaire moyen à la sortie, après déjustification, est le même que le débit binaire moyen à l'entrée avant justification. Etant donné qu'aucun glissement ne se produit à l'interface entre la première liaison et la liaison justifiée, des glissements peuvent encore se produire à l'interface entre l'extrémité déjustifiée de la seconde liaison et une troisième liaison si le rythme d'horloge de la troisième liaison est différent de celui de la première liaison.

Le temps de propagation dans un seul sens sur une liaison passant par un satellite géostationnaire peut, en raison de perturbations de l'orbite, présenter une variation cyclique journalière dont l'amplitude crête-à-crête est de l'ordre de 0,15 à environ 1,5 ms. La dérive longitudinale du satellite par rapport à sa position nominale peut, en outre, causer des variations cycliques à plus long terme dont l'ordre de grandeur est à peu près le même. Ces variations donnent lieu à un effet Doppler qui s'exerce sur la fréquence d'horloge de la liaison par satellite et qui peut être compensé dans les stations terriennes, à l'émission ou à la réception, suivant l'application, par l'emploi de mémoires-tampons élastiques. Pour assurer la conversion entre deux débits binaires légèrement différents, les signaux sont enregistrés dans la mémoire à la vitesse de réception et lus à la vitesse d'émission. Si la vitesse d'émission est plus grande que celle de réception, la mémoire aura tendance à se combler. Comme les mouvements du satellite sont limités, les deux cas se présenteront alternativement et la moyenne dans le temps sera nulle. On peut concevoir qu'en dimensionnant convenablement la capacité de la mémoire on peut absorber sans perte ni répétition d'information les variations extrêmes de débit.

On devra, en définitive, recourir à une liaison internationale numérique par satellite pour réaliser l'interconnexion de deux ou plusieurs réseaux numériques de Terre indépendants.

Si la base de temps de la liaison par satellite est verrouillée à l'horloge de haute stabilité commandant l'un de réseaux (réseau A), aucun glissement supplémentaire ne se produira sur les liaisons entre le réseau A et les autres réseaux à condition que l'effet Doppler soit compensé par des mémoires-tampons élastiques situées à l'interface. Des glissements supplémentaires se produiront cependant sur les liaisons entre les autres réseaux. Si la base de temps de la liaison par satellite est indépendante, d'autres glissements se produiront à moins que l'on ait recours à la justification à l'interface entre la liaison par satellite et les réseaux de Terre. L'utilisation d'une telle liaison avec justification n'aura pas d'incidence sur le taux de glissement net résultant des décalages de temps entre les horloges des deux réseaux.

Il convient de noter que la composante d'erreur de synchronisation due à la variation du temps de propagation sur la liaison par satellite, sera à nouveau présente après le point auquel la déjustification a été appliquée et il faudra employer des mémoires-tampons élastiques pour compenser cet effet. Il convient aussi de se rappeler que le recours à la justification imposerait des restrictions en ce qui concerne l'exploitation des liaisons à destinations multiples et l'application de techniques de concentration numérique de la conversation (CNC).

2.4 *Transmissions de signaux multiplex d'ordre supérieur*

La transmission de signaux multiplex d'ordre supérieur doit être possible entre des pays utilisant la même hiérarchie numérique, lorsque la liaison par satellite est sans AMRT et n'utilise pas la CNC. En revanche, avec l'AMRT, on s'expose aux inconvénients suivants:

- aucune stratégie simple de glissement ne peut être appliquée à la jonction. Cela tient au fait qu'il serait nécessaire de supprimer ou de répéter une ou plusieurs des trames de multiplexage d'ordre supérieur sans modifier l'intégrité des trames multiplex du premier ordre contenues dans les trames précédentes. Etant donné que le nombre de trames de multiplexage primaire dans une trame multiplex du deuxième ordre n'est pas un nombre entier, il faudra appliquer soit une stratégie de glissement très complexe soit un autre ordre de justification;
- dans un système AMRT à destinations multiples, l'entrelacement des bits du signal multiplex d'ordre supérieur compliquerait encore l'équipement de démultiplexage associé à une salve à destinations multiples. Chacune des destinations devrait traiter la totalité de la sous-salve associée au module de jonction de l'émetteur, afin de séparer le trafic multiplex destiné à la station de réception correspondante. On risque ainsi de perdre une partie de l'efficacité de l'AMRT;
- la CNC n'est pas aussi facilement réalisable à des niveaux supérieurs car les huit bits associés à chaque voie de conversation ne sont pas faciles à identifier étant donné l'entrelacement des bits dans le signal multiplexé.

3. Discussion des solutions

3.1 *Réseaux nationaux analogiques à commutation*

Il ne semble pas souhaitable d'opérer les conversions analogique-numérique aux stations terriennes étant donné qu'il sera nécessaire d'incorporer un équipement de multiplexage des voies. Un autre multiplexage étant aussi nécessaire au Centre international de transit (CT), il serait bien entendu préférable de prévoir une liaison CT-station terrienne numérique. Toutefois, puisque le réseau de Terre est surtout analogique, la commutation

numérique au CT n'est pas utilisée et le rythme d'horloge de la liaison numérique n'a pas une importance fondamentale. Dans le cas de systèmes MDP point à point, on devrait donc pouvoir commander le débit binaire de la partie de réception de Terre de la liaison à partir d'une horloge dérivée à la station terrienne. Cette horloge proviendrait de l'horloge à l'extrémité d'émission de l'équipement de codage au CT éloigné. Pour des systèmes AMRT, on obtiendrait l'horloge d'après l'horloge de référence de trame produite par la station de référence. L'effet Doppler dû au mouvement du satellite sera vraisemblablement insignifiant. Toutefois, s'il faut éliminer totalement le glissement, les variations d'horloge dues à l'effet Doppler devront être absorbées à l'aide de mémoires-tampons élastiques, à l'extrémité de réception de la liaison. Cette solution permettrait de ne perdre aucune des informations numériques. L'utilisation de la CNC dans des systèmes AMRT n'a aucune répercussion sur l'application de cette solution.

3.2 *Commutation numérique au CT, réseaux nationaux asynchrones*

Dans ce cas, il y aura en général une petite différence de rythme entre l'horloge qui commande le commutateur au CT et les signaux numériques entrant dans le CT. Ainsi, les glissements de trame devront être autorisés. Dans ce cas, il semble inutile d'éviter d'autres glissements de trame à la jonction de la station terrienne. En admettant que l'horloge du CT ait une précision de 1×10^{-8} et l'horloge de la station de référence AMRT une précision de 1×10^{-7}, un glissement de trame de 125 µs MIC se produirait toutes les 19 minutes au maximum si le satellite était placé sur une orbite géostationnaire idéale, et toutes les 12 minutes au maximum si l'orbite du satellite avait une inclinaison de 3°, sans mémoire-tampon régulatrice pour compenser les variations du temps de propagation.

En pareil cas, il suffit donc que l'EJND effectue l'alignement et les glissements de trame ainsi que toutes les modifications nécessaires du format de trame (voir le § 3.1). Pour les satellites sans commande d'inclinaison sur l'orbite, l'EJND peut aussi avoir besoin d'une mémoire-tampon régulatrice pour compenser les variations du temps de propagation.

3.3 *Commutation numérique avec des réseaux nationaux synchrones*

Le CCITT a recommandé que l'interfonctionnement entre des réseaux nationaux synchrones soit plésiochrone. Avec les réseaux nationaux commandés avec une précision de 1×10^{-11}, il y aurait un minimum de 70 jours entre deux glissements de trame.

Lorsque la liaison internationale est effectuée au moyen d'un système à satellites avec AMRT dans lequel la précision d'horloge de référence est nettement moins bonne que 1×10^{-11}, le rythme des glissements de trame doit être sensiblement supérieur à un glissement tous les 70 jours; sinon, on peut utiliser un EJND avec justification. Deux méthodes de justification applicables à des systèmes de multiplexage primaires AMRT sont examinées dans l'Annexe I. Toutefois, on évite cette complication si le système AMRT lui-même est réglé pour une précision comparable à celle des réseaux nationaux, à savoir 1×10^{-11}. Dans ce cas, l'EJND devra effectuer l'alignement, apporter toutes les modifications nécessaires au format et compenser les variations de temps de propagation causées par le mouvement des satellites à l'aide de mémoires-tampons élastiques aux extrémités d'émission et de réception de la liaison. Il s'agit donc de la solution préférée pour l'interconnexion de réseaux nationaux synchrones.

Dans un système AMRT réel, seul un nombre relativement petit de stations terriennes doivent faire office de stations de référence. Il doit donc être facile d'obtenir la précision de rythme nécessaire de l'AMRT en utilisant comme stations de référence les stations des pays à réseaux numériques synchrones. Cependant, dans le cas du système (AMRT-CS à commutation par satellite) que l'on prévoit d'introduire dans les réseaux à satellite internationaux dans un avenir très proche, il peut être difficile d'exploiter le système AMRT sur une base plésiochrone, si le rythme de commutation du satellite n'est pas commandé à partir du sol. Dans une première étape, il peut être nécessaire, si les pays à réseaux synchrones sont très peu nombreux, d'accepter une précision de rythme moins bonne pour le système AMRT, et d'admettre des glissements plus fréquents, un par jour peut-être. Malgré cela, il est préférable de concevoir un système à satellite AMRT ou AMRT-CS capable de fonctionner en mode plésiochrone entre les réseaux numériques de Terre dont il assure l'interconnexion.

3.4 *Interconnexion entre pays utilisant des systèmes de multiplexage primaire différents*

Dans le cas d'une interconnexion entre des pays utilisant des systèmes de multiplexage primaire différents, il n'est pas pratique de conserver le format de trame entre les différents multiplexeurs. Toutefois, il faudra toujours conserver l'intégrité des intervalles de temps de voies. En pareils cas, l'EJND de la station terrienne d'émission devra supprimer tous les bits supplémentaires, pour la signalisation, le verrouillage de trame, etc.

L'EJND de la station terrienne de réception devra restituer le multiplex primaire qui peut être utilisé dans ce pays. Même entre des pays utilisant le même dispositif de multiplexage primaire, il peut être nécessaire ou souhaitable de modifier quelque peu le format de trame pour qu'il corresponde au format du système AMRT.

4. Questions liées à la signalisation et à la surveillance

Le CCITT a défini les caractéristiques nécessaires des équipements multiplex numériques MIC utilisés dans les réseaux de télécommunications. Il a aussi défini les renseignements sur les conditions de dérangement qui devraient être transmises à l'extrémité d'une liaison pour assurer une surveillance efficace (Avis G.734 par

exemple). Mais les études qui ont conduit à cette définition n'ont jamais considéré que des liaisons point à point. Pour des systèmes à satellites où les liaisons à destinations multiples sont courantes, notamment en AMRT, ces conclusions ne sont plus nécessairement valables et des études ultérieures sont nécessaires. En particulier, il se peut fort bien qu'on doive considérer une liaison CT-station terrienne-satellite-station terrienne-CT comme constituée de trois tronçons indépendants du point de vue des alarmes. Dans ce cas, et de ce point de vue, les stations terriennes seraient considérées comme des terminaux de multiplex. Cependant, pour ce qui est de la commutation, la liaison entre les CT constitue un tronçon.

En ce qui concerne la transmission, il paraît inutile de faire passer les alarmes d'une section à l'autre. Cependant, certains systèmes de signalisation nécessitent une information sur les défaillances de la ligne de transmission. Dans ces systèmes de transmission, le signal d'indication d'alarme de service doit en conséquence être transmis vers l'avant.

Les systèmes comportant une voie commune de signalisation tel que le système N° 6 du CCITT ne semblent pas présenter de difficultés à l'heure actuelle. Les systèmes N° 5 et R2 du CCITT seront aussi utilisés au cours de la prochaine décennie pour les liaisons numériques par satellite (on notera à ce propos que de récents essais montrent que, dans les liaisons par satellite, le temps d'établissement de la communication, à partir de la fin de la numérotation, est nettement moindre avec le système R2 du CCITT qu'avec le système N° 5). On trouvera ci-après une récapitulation des exigences de chacun de ces systèmes. La mise en œuvre d'autres systèmes devra être étudiée en détail.

Système N° 5 du CCITT:

La transmission de signaux d'indication d'alarme n'est pas nécessaire. La procédure de transmission avec destinations multiples peut s'effectuer, à l'intérieur du satellite, au niveau des voies.

Système R2 analogique du CCITT:

Les signaux d'indication d'alarme doivent être transmis vers l'avant. Il faudra distinguer les défaillances qui affectent toutes les voies de multiplexage (par exemple, la perte du verrouillage de trame) de celles qui n'affectent que l'intervalle de temps de voie 16 (perte du signal de verrouillage de multitrame).

Dans le satellite, la transmission avec destinations multiples ne peut s'effectuer qu'au niveau du multiplexage primaire.

Système R2 numérique du CCITT:

Les signaux d'indication d'alarme doivent être transmis vers l'avant, mais cela peut s'effectuer au niveau des voies. Si l'on transmet séparément les alarmes dans chaque voie, la distinction entre les deux types de défaillance est inutile.

Les transmissions avec destinations multiples à l'intérieur du satellite peuvent s'effectuer au niveau des voies.

On trouvera dans l'Annexe II une méthode de traitement pour la transmission de la signalisation et des indications d'alarme.

5. Interface pour la télévision numérique

Le développement de la télévision numérique, surtout pour les processus de studio, a fait son apparition depuis quelques années et des spécifications concernant la transmission commencent à apparaître. La transmission terrestre adoptera des techniques adaptées aux niveaux hiérarchiques recommandés par le CCITT. Dans certains pays, l'accès au réseau sera possible à environ 68 Mbit/s, ce qui représente un débit binaire approprié à un canal de télévision.

Il n'existe pas encore de moyen clairement défini pour la transmission par satellite de signaux de télévision numérique, mais il devrait être possible d'utiliser les répéteurs de satellite initialement conçus pour la téléphonie MF-MRF et actuellement employés pour la transmission de signaux de télévision MF. Les répéteurs destinés à la téléphonie AMRT pourraient également être utilisés.

Il sera sans doute nécessaire dans l'avenir de pouvoir raccorder aisément les transmissions de télévision numérique terrestres avec les transmissions par satellite. Ceci ne semble pas être le cas actuellement puisqu'il n'existe pas, par exemple, de plans pour le transfert d'un paquet complet de téléphonie à 140 Mbit/s par satellite; du point de vue de la téléphonie, ce besoin n'existe pas. De même, des transmissions expérimentales réussies de signaux de télévision numérique par satellite ont eu lieu à 60 Mbit/s, mais la transmission d'un train à 60 Mbit/s peut apparaître comme un gaspillage sur une liaison terrestre à 140 Mbit/s. De plus, la télévision à 60 Mbit/s pourrait peut-être être incorporée à la téléphonie AMRT pour occuper, par exemple, un répéteur à 120 Mbit/s mais, quand l'exploitation limite l'emploi du répéteur à la seule télévision, il serait peu intéressant d'avoir à employer, à la réception, un équipement AMRT.

La transmission par satellite de signaux de télévision sous forme numérique est envisagée pour certains satellites régionaux; elle peut prendre encore plus d'intérêt lorsque la sécurité commerciale des transmissions (qui peuvent être reçues par des antennes paraboliques de petit diamètre) revêt de l'importance.

6. Conclusions

Il est possible d'utiliser des liaisons par satellite plésiochrones ou justifiées pour interconnecter des réseaux numériques, mais le fonctionnement plésiochrone posant moins de problèmes il est recommandé de l'appliquer.

Les variations périodiques du temps de propagation produites par des satellites géostationnaires peuvent être compensées à l'aide de la technique de la mémoire-tampon; dans ce cas, il ne se produira aucun glissement de trame dû à ces variations.

Il est nécessaire de poursuivre l'étude de certains aspects des liaisons numériques par satellite et notamment des conditions de signalisation et d'indication d'alarme. Certains de ces problèmes ont été examinés et des suggestions ont été présentées pour la transmission numérique. Le temps de propagation relativement long dû aux satellites ne pose pas de problème particulier pour le fonctionnement plésiochrone. Les effets du temps de propagation sur des réseaux numériques font l'objet du Programme d'études 2Q/4.

ANNEXE I

DEUX EXEMPLES DE TECHNIQUES DE JUSTIFICATION APPLICABLES AU SYSTÈME AMRT

1. Caractéristiques des systèmes AMRT

L'AMRT est une technique numérique selon laquelle plusieurs stations terriennes utilisent un récepteur de satellite donné sur la base d'un partage dans le temps. Chaque porteuse est utilisée pour des salves de signaux, elle est émise de façon intermittente par différentes stations terriennes et, dans le répéteur, elle n'empiète pas sur les salves émises par d'autres stations.

Dans des systèmes AMRT, la période de trame est actuellement conçue comme un multiple entier de 125 µs et la longueur de la salve peut varier selon le volume du trafic. La partie préambule de la salve contient le signal de synchronisation de trame permettant de synchroniser la salve et la partie information comprend les données nécessaires à des destinations multiples.

En résumé, la liaison AMRT diffère d'un trajet numérique de Terre sur les points suivants:

- Chaque salve comporte des bits de préambule destinés à la synchronisation des salves.
- Il s'agit d'une liaison entre un point et des points multiples.
- Le terminal comporte des mémoires-tampons.
- On peut faire varier la capacité de la liaison en modifiant la longueur des salves.

2. Trame de jonction numérique directe (JND) pour les transmissions AMRT

Ainsi qu'il a été mentionné ci-dessus, la liaison AMRT présente plusieurs caractéristiques qui diffèrent de celles des trajets numériques de Terre. Par conséquent, pour établir la structure de trame d'une salve AMRT, il convient de prendre en considération les caractéristiques de la liaison AMRT aussi bien que la simplicité du matériel en jonction.

On trouvera ci-après la description d'une structure de trame possible, adaptée à la transmission de groupes MIC primaires via une liaison AMRT.

- Le signal de synchronisation de la salve peut être utilisé pour la détection des chiffres du service de justification et des intervalles de temps de justification: il n'est donc pas nécessaire d'inclure le signal de verrouillage de trame dans chaque trame de justification.
- Il est inutile de composer les groupes multiplex d'ordre plus élevé en entrelaçant les éléments binaires, puisque le terminal AMRT comporte des mémoires-tampons. De plus, considérant le fait que la liaison AMRT est une liaison d'un point vers des points multiples, et le fait que la capacité de la liaison peut être modifiée par changement de longueur des salves, l'adoption de l'entrelacement tributaire facilite l'extraction des données désirées à l'extrémité réceptrice et donne la souplesse que procure le changement de la capacité de la liaison. Le concept général de l'«entrelacement tributaire» est représenté par la Fig. 1.
- Afin de maintenir à un niveau suffisamment faible la probabilité des erreurs de justification, cinq bits sont requis, à titre d'éléments numériques du service de justification, pour chaque trame de justification.
- Il est souhaitable, pour simplifier le terminal AMRT, de choisir des multiples entiers de 64 kbit/s à titre de débit binaire brut de justification.

3. Exemples de structure de trame de justification

Le Tableau I représente les caractéristiques principales de la structure de trame de justification souhaitable pour les normes primaires de MIC à 1,544 Mbit/s et à 2,048 Mbit/s, et les Fig. 2 et 3 illustrent le détail du format de trame.

Les caractéristiques principales peuvent être résumées de la façon suivante:

- Dans le Tableau I, le type A est conçu d'après un système AMRT ayant une durée de trame de 750 µs; dans ce système, on utilise une technique de justification positive alors qu'une technique de justification positive-négative est utilisée pour le format de trame du type B.
- Les débits binaires bruts sont 1,6 Mbit/s pour le système primaire à 1,544 Mbit/s et 2,112 Mbit/s pour le système primaire à 2,048 Mbit/s, ce qui correspond respectivement à 25 et 33 voies MIC.
- Le signal de commande de la justification est composé de cinq bits, et chaque bit est disposé de manière à être séparé par le même intervalle dans la trame de justification représentée sur les Fig. 2 et 3.

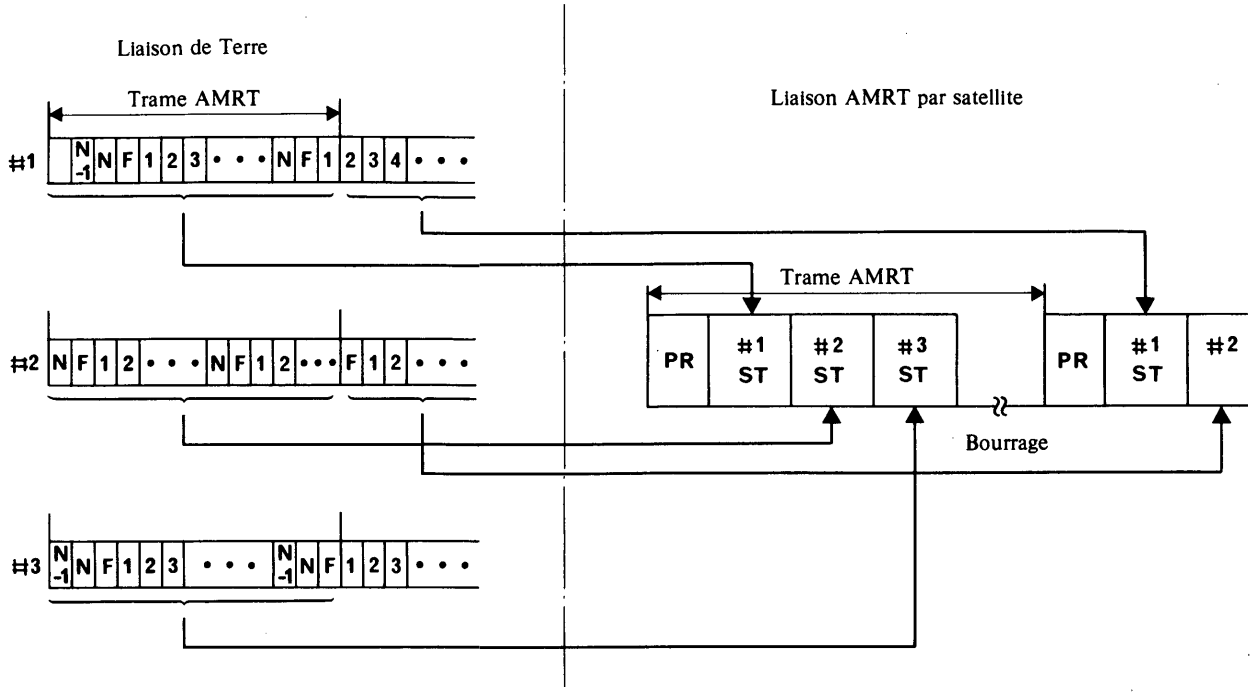
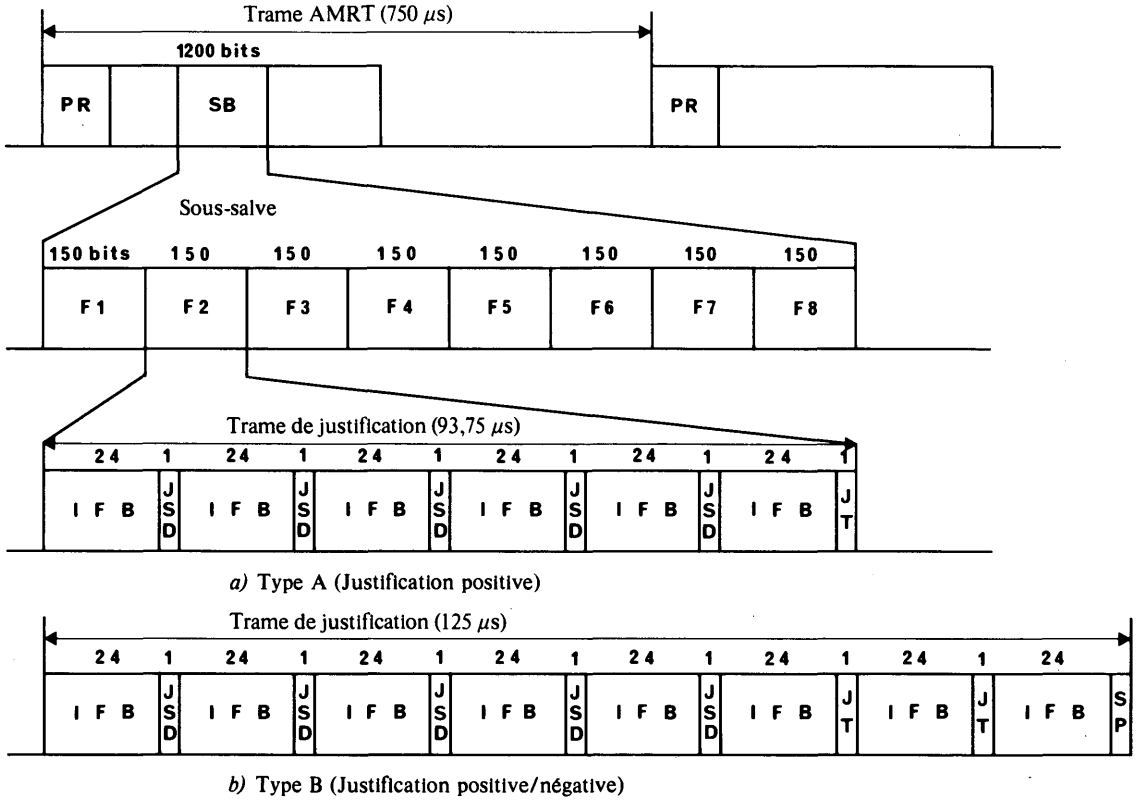


FIGURE 1 — *Conception générale de l'entrelacement tributaire AMRT proposé*

F: Bit de verrouillage
PR: Préambule

TABLEAU I — *Exemples de structure de trame de justification*

	Unités	Type A	Type B	Type A	Type B
Débit binaire MIC à l'entrée	Mbit/s	1,544		2,048	
Débit binaire brut	Mbit/s	1,6		2,112	
Technique de justification		positive	pos./nég.	positive	pos./nég.
Trame de justification	s	93,75	120	83,3	120
Bit d'information	bits/trame	144	192	170	255
Chiffre du service de justification	bits/trame	5	5	5	5
Intervalle de temps de justification	bits/trame	1	2	1	2
Bit de réserve	bits/trame	150	200	176	264
Rapport de bourrage		0,25	(0,5)	0,33	(0,5)

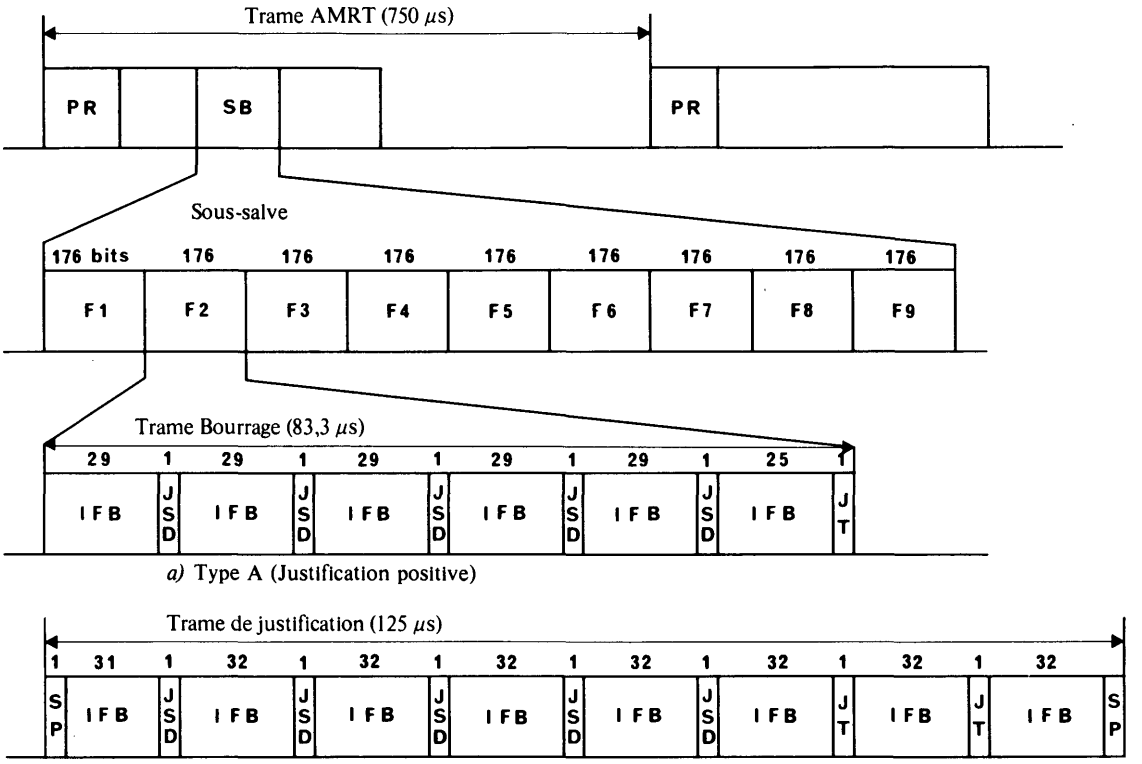


a) Type A (Justification positive)

b) Type B (Justification positive/négative)

FIGURE 2 — *Structure de trame pour JND à 1,544 Mbit/s*

IFB: Bits d'information
JSD: Chiffre du service de justification
JT: Intervalle de temps de justification
SE: Bits de réserve
PR: Préambule



a) Type A (Justification positive)

b) Type B (Justification positive/négative)

FIGURE 3 — *Structure de trame pour fonction numérique directe (JND) à 2,048 Mbit/s*

IFB: Bits d'information
JSD: Chiffre du service de justification
JT: Intervalle de temps de justification
SB: Bits de réserve
PR: Préambule

4. Réalisation d'un matériel expérimental de jonction numérique directe (JND)

Un appareil expérimental de jonction numérique directe (JND) approprié à un système MIC primaire à 1,544 Mbit/s a été construit d'après le format de trame du type A représentée dans le Tableau I.

La Fig. 4 représente le schéma de principe simplifié. Du côté de l'émission, les signaux MIC à 1,544 Mbit/s émis de la Terre sont convertis en signaux MIC à 1,6 Mbit/s au moyen d'une technique de justification positive et, après avoir été comprimés dans le temps par le tampon de compression, ils passent au terminal AMRT. Du côté de la réception, les signaux MIC provenant du terminal AMRT sont convertis, au tampon d'expansion, en signaux continus à 1,6 Mbit/s. Le chiffre du service de justification (JSD) est alors extrait des signaux MIC à 1,6 Mbit/s en utilisant les signaux de commande de rythme provenant du terminal AMRT. Le détecteur de JSD décide si l'intervalle de durée du chiffre de justification est un bit contenant une information ou un bit fantôme, et le signal MIC initial à 1,544 Mbit/s est rétabli.

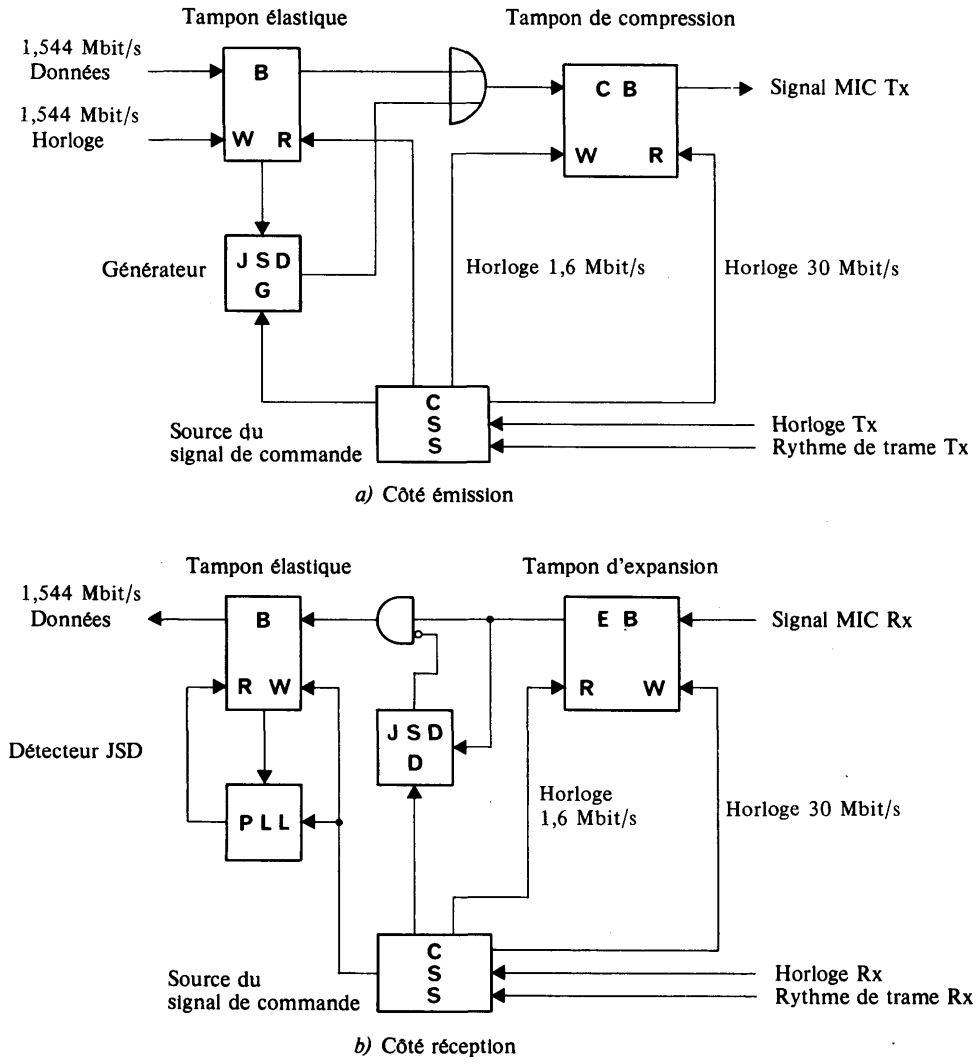


FIGURE 4 — *Schéma de principe de la jonction numérique directe (JND)*

JSS: Elément numérique du service de justification
PLL: Boucle à verrouillage de phase

ANNEXE II

TRANSMISSION DES CONDITIONS DE SIGNALISATION ET D'ALARME SUR LES LIAISONS NUMÉRIQUES PAR SATELLITE, AVEC MULTIPLEXAGE MIC PRIMAIRE

1. Introduction

Le CCITT a défini les caractéristiques nécessaires pour les équipements multiplex numériques MIC utilisés dans les réseaux de télécommunications, mais seulement pour une section de bout en bout. Dans les télécommunications par satellite, il y a de bonnes raisons de prendre en considération trois sections de transmission, dont deux nationales et une internationale. Il est vrai que, du point de vue de la commutation, la liaison entre les centres de transit constitue une section unique.

On propose une méthode de transmission par satellite avec multiplexage MIC qui tienne compte, d'une part, des techniques AMRT-CNC (concentration numérique des conversations) et, d'autre part, de la nécessité de respecter les conditions spécifiées par le CCITT.

On a supposé une liaison numérique entre centres internationaux dans laquelle la ligne de Terre entre le centre de transit et la station terrienne est synchronisée avec l'équipement AMRT. On considère uniquement la jonction avec des multiplex primaires MIC à 2048 kbit/s. Si le multiplex de Terre est d'un ordre supérieur, on suppose que la jonction s'effectue au niveau du multiplex primaire.

2. Systèmes numériques par satellite

Les systèmes AMRT prévus peuvent utiliser des modules CNC pour un maximum de 240 voies de Terre, qui peuvent être converties en 120 voies de satellite au maximum. Pour augmenter la capacité réelle du satellite, il faudrait ne transmettre que les voies de Terre effectivement en service, et éliminer de la liaison spatiale celles qui ne sont pas opérationnelles. En outre, il convient de réduire au maximum les pertes de capacité dues à la transmission des voies de synchronisation et de signalisation utilisées dans les équipements de multiplexage MIC.

Les avantages des techniques à destinations multiples offerts par les satellites ne doivent pas être limités par la structure utilisée dans les réseaux de Terre. Par conséquent, il faudrait prévoir l'utilisation de la technique à destinations multiples au niveau du multiplex primaire et, si possible, jusqu'à celui de la voie. De plus, la solution qui sera adoptée pour le système à satellites devra permettre l'utilisation de tout système de signalisation compatible avec le temps de propagation du système.

3. Multiplexage MIC à 2048 kbit/s

Dans le multiplexage MIC à 2048 kbit/s, on utilise l'intervalle de temps de voie 0 dans les trames impaires pour le signal de verrouillage de trame, tandis que dans les trames paires on insère un bit d'indication d'alarme international et plusieurs bits de réserve pour l'usage national.

Il n'est pas nécessaire de transmettre le signal de verrouillage de trame par l'intermédiaire du satellite, étant donné que le système AMRT a son propre signal de synchronisation de trame, qui définit parfaitement la position exacte des différentes voies téléphoniques à l'intérieur de la trame AMRT; on peut donc reconstituer la trame de multiplex MIC dans la station terrienne de réception. Cependant, si l'on veut éviter la transmission du signal de verrouillage de trame, il faut prendre en considération certains aspects relatifs aux alarmes de transmission et de signalisation.

Pour les systèmes de commutation avec voie de signalisation associée, on emploie l'intervalle de temps de voie 16 qui comprend une multitrame formée de 16 trames consécutives. Le signal de verrouillage de multitrame est 0000, qui occupe les intervalles de temps des bits 1 à 4 de la trame 0. Dans cette trame 0, les bits 5, 7 et 8 sont des bits de réserve et le bit 6 est utilisé pour indiquer à l'extrémité éloignée la perte du verrouillage de multitrame. Les 15 trames restantes se subdivisent chacune en deux blocs de quatre bits et chacun de ces blocs est assigné à l'une des 30 voies téléphoniques.

4. Conditions imposées par le CCITT pour la transmission des alarmes

L'Avis G.732 du CCITT se réfère à la liaison entre deux équipements de multiplexage dans laquelle le signal n'a subi aucune manipulation.

Dans un système à satellites utilisant des techniques AMRT-CNC, les groupes primaires MIC pourraient être transmis sans modifications autres que celles qui sont nécessaires pour les insérer dans la trame AMRT, mais il faudrait pour cela affecter deux voies en permanence, sans concentration des conversations, aux intervalles de temps de voie 0 à 16. En supposant que la technique CNC présente un avantage de 2/1, la perte de capacité dans le satellite serait alors de 12%. On pourrait l'éviter en ne transmettant que le signal de verrouillage de trame et en reconstituant l'information contenue dans les intervalles de temps de voie 16 de telle sorte qu'il n'y ait qu'une voie AMRT de signalisation par module CNC. Dans ce cas, la perte de capacité serait inférieure à 1%.

Avec cette structure, la liaison par satellite utilise sa propre information de trame, ce qui élimine la transmission, entre stations terriennes, du signal de verrouillage de trame MIC et du signal de verrouillage de multitrame. Cela étant, il faut considérer le circuit entre centres de transit comme formé de trois sections en série dont deux nationales, entre le Centre de transit et la station terrienne, et une internationale, entre stations terriennes. Il en résulte que, dans chaque station terrienne, les défaillances suivantes devront être décelées dans la section nationale: perte du verrouillage de trame, perte du signal d'entrée à 2048 kbit/s, propagation d'un nombre excessif d'erreurs dans le signal de verrouillage de trame et perte du signal de verrouillage de multitrame (si l'on utilise l'intervalle de temps de voie 16). Il faudra alors transmettre l'indication de l'alarme vers l'extrémité éloignée de la section nationale.

Pour la section internationale, comprise entre les stations terriennes, l'équipement AMRT-CNC comporte un système d'alarme équivalant à celui des équipements de multiplexage MIC.

Du point de vue de la signalisation, il n'y a entre les deux centres de transit qu'une section, pour laquelle il faut définir une méthode de transmission des alarmes d'une section à l'autre. Dans les systèmes R2 du CCITT une défaillance quelconque se traduisant par le déclenchement d'une alarme de service (indiquant que le circuit n'est pas disponible pour le service) devra être communiquée dans le sens en avant aux sections suivantes, afin que les équipements de commutation et de signalisation reçoivent l'indication correspondante.

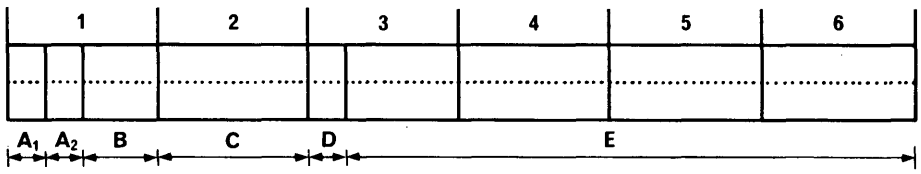
5. Voie AMRT pour la transmission d'alarmes et de la signalisation

La solution suggérée dans le présent Rapport a les caractéristiques suivantes:

- la capacité du satellite n'est pas gravement diminuée (moins de 1%) si l'on utilise une seule voie AMRT pour chaque module CNC de 240 voies téléphoniques;
- dans les systèmes comportant une signalisation associée à la voie, la transmission des alarmes de groupe n'est pas retardée de plus de 1,5 ms par rapport à l'information de signalisation;
- les équipements de multiplexage MIC des lignes de Terre peuvent accepter indifféremment des voies fonctionnant avec différents systèmes de signalisation ou de transmission de données sans que l'une d'elles soit affectée défavorablement par la transmission des alarmes.

Dans le système à satellites, chacun des modules CNC de 240/120 circuits devra disposer d'une voie AMRT affectée en permanence à la transmission des alarmes de groupe et des messages de signalisation. Ce module CNC comporte huit multiplex MIC de Terre de 30 voies ou un nombre supérieur de multiplex de Terre si toutes les voies de chacun d'eux ne sont pas en service.

La structure proposée pour cette voie est la suivante:



A_1 : Fonction

00 – Transmission de la signalisation
11 – Transmission des alarmes de groupe

A_2 : Sous-fonction

11 – Alarme dans le sens en avant. Interruption de service
00 – Alarme dans le sens en avant. Perte du signal de verrouillage de multitrame

B: Bits de réserve

C: Identification du multiplex (de 1 à 8)

Chaque bit correspond à un multiplex, et c'est pourquoi on peut transmettre simultanément des signaux d'alarme qui en affectent plus d'un. Un zéro transmis dans le bit correspondant au multiplex de Terre en question indique l'absence ou la disparition d'un dérangement.

D: Identification du bit de signalisation

00 – bit *a* de l'intervalle de temps de voie 16
01 – bit *b* de l'intervalle de temps de voie 16
10 – bit *c* de l'intervalle de temps de voie 16
11 – bit *d* de l'intervalle de temps de voie 16

E: Information de signalisation des 30 voies téléphoniques du multiplex MIC choisi

Pour les bits de réserve B, on peut avoir les possibilités ci-après:

- extension jusqu'à 12 équipements de multiplexage MIC où chaque bit correspond à l'un des quatre multiplex supplémentaires;
- extension supérieure; dans ce cas, les bits de B peuvent indiquer l'ensemble de multiplex MIC auquel correspond l'information;
- autres fonctions à spécifier.

Comme la durée de la trame AMRT est de 750 µs et qu'elle groupe six trames MIC de 125 µs, les 48 bits peuvent être transmis sur une trame AMRT correspondant à une voie téléphonique. Cependant, cette information devant être protégée contre les erreurs aléatoires, il est recommandé d'appliquer un code de correction des erreurs. Etant donné que, dans l'équipement CNC, on utilise pour la voie d'assignation un code de Hagelbarger comportant 24 bits d'information et 24 bits de parité, il est recommandé d'utiliser le même schéma pour cette nouvelle voie de signalisation. C'est pourquoi il faudra deux trames AMRT pour compléter la transmission des 48 bits que comprend le message d'alarme et de signalisation.

6. Transmission des alarmes de groupe

L'ordre de priorité à appliquer à la transmission des alarmes et des bits de signalisation devra être le suivant:

- l'alarme vers l'avant qui indique que le multiplex MIC est hors de service;
- l'alarme vers l'avant qui indique une défaillance de la multitrame de l'intervalle de temps de voie 16;
- les bits de signalisation.

L'alarme vers l'avant indiquant que l'équipement de multiplexage MIC est hors de service est donnée lorsque l'on décèle une défaillance qui affecte tout le groupe (par exemple, perte du signal du verrouillage de trame) ou lorsque l'on a appliqué un signal d'indication d'alarme dans le train de bits à 2048 kbit/s, en cas d'utilisation d'un multiplexage d'un ordre supérieur entre le centre de transit et la station terrienne. Dans le second cas, il importe d'empêcher la transmission des voies téléphoniques correspondantes car, étant donné l'application du signal d'indication d'alarme, tous les bits sont dans l'état 1, et il faut éviter une surcharge inutile de l'équipement CNC. Dans le premier cas, il est également recommandé d'éviter la transmission afin de réduire le volume du trafic à l'entrée du CNC. Actuellement, les équipements CNC sont déjà dotés de cette possibilité de blocage. Pour transmettre cette alarme dans le sens en avant, c'est-à-dire de la station terrienne de réception jusqu'au centre de commutation international, il faut appliquer au train de bits de 2048 kbit/s un signal d'indication d'alarme.

On peut donner, dans le sens en avant, l'indication de la perte du verrouillage de multitrame de l'intervalle de temps de voie 16, de la station terrienne de réception au centre de commutation, en utilisant le bit 6 de la trame 0 de l'intervalle de temps de voie 16, que l'Avis précité du CCITT réserve à la transmission de cette alarme vers l'extrémité éloignée.

La structure proposée pour la voie de signalisation dans le satellite permet de transmettre simultanément différentes alarmes de groupe, en tout temps et pour autant que les groupes affectés appartiennent au même bloc (un bloc comprend huit groupes). Si l'on affecte plus de huit groupes à un module CNC, il se peut qu'une alarme soit donnée en même temps dans deux groupes appartenant à des blocs différents; cependant, la probabilité d'une telle situation est pratiquement négligeable, à moins que la défaillance ne soit imputable à une erreur provenant de l'équipement de multiplexage MIC de l'ordre supérieur. Toutefois, dans des conditions normales, le retard dans la transmission de l'alarme ne dépassera pas 1,5 ms.

Cette information doit être transmise par l'intermédiaire du satellite chaque fois que se produit une modification de l'état de l'un des groupes ou de l'une des voies. De plus, pour conserver la fiabilité de l'information, il faut transmettre des messages de rappel, c'est-à-dire indiquer à nouveau la situation des voies ou de l'équipement de multiplexage MIC lorsqu'il n'y a pas d'autre information à transmettre sur cette voie de signalisation.

7. Transmission de la signalisation sur les voies

Certains systèmes de signalisation utilisent une voie de signalisation associée. On peut transmettre ces signaux en utilisant les bits affectés à chaque voie téléphonique dans l'intervalle de temps de voie 16. Cette information étant liée à l'établissement ou à la coupure des conversations téléphoniques, la structure envisagée permet de prévoir une marge considérable pour les besoins de la transmission de l'information; en effet, du point de vue statistique, on peut considérer que la durée moyenne d'une communication, y compris les communications «inefficaces», est approximativement 2 minutes et demie.

L'application du code de Hagelbarger protège cette voie contre d'éventuelles erreurs sur les bits et garantit une information aussi fiable que celle que contient le message d'affectation de la CNC.

SECTION 4D: PROCÉDÉS DE MODULATION ET ACCÈS MULTIPLE

Rapports

RAPPORT 708-1

TECHNIQUES D'ACCÈS MULTIPLE ET MÉTHODES DE MODULATION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programmes d'études 2D/4 et 2E/4)

(1978-1982)

1. Introduction

L'accès multiple est la possibilité, pour un grand nombre de stations terriennes, d'interconnecter simultanément leurs liaisons de transmission respectives par l'intermédiaire d'un même système [Puente et autres, 1971]. Cette possibilité est importante dans un système à satellites, du fait que la zone couverte par l'antenne d'un satellite a une grande étendue. Une émission en provenance d'une station terrienne peut donc être reçue en de nombreux emplacements géographiquement distincts.

Dans le présent Rapport, on va examiner plusieurs techniques d'accès multiple. Comme l'efficacité de chaque technique est étroitement liée à la méthode de modulation choisie, il est nécessaire d'examiner aussi les méthodes de modulation. Il convient toutefois de souligner que l'accès multiple et la modulation sont deux notions différentes. L'accès multiple est essentiellement lié au trafic; la modulation, à la transmission. Pourtant, lorsqu'il s'agit d'optimaliser l'exploitation d'un système à satellites, elles sont l'une et l'autre très importantes, et l'on suppose souvent implicitement qu'une certaine méthode de modulation est inévitablement associée à une technique d'accès multiple particulière.

On commencera dans ce Rapport par examiner les caractéristiques des signaux modulants qui sont normalement transmis par un système à satellites à accès multiple. D'ordinaire, on soumet ces signaux à un certain traitement avant de les émettre vers le satellite. Ce traitement est parfois déterminé par la liaison d'interconnexion de Terre (par exemple, dans le cas d'une modulation par impulsions et codage (MIC)), mais on y recourt aussi parfois pour augmenter la capacité que le système à satellites possède en écoulement de trafic (par exemple, dans le cas d'une concentration de la conversation (CC)).

On examinera ensuite les méthodes de modulation le plus communément utilisées dans les systèmes à accès multiple, ce qui conduira à un exposé général de ces systèmes. Cette partie du Rapport couvrira les techniques d'accès multiple le plus couramment employées, c'est-à-dire l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) et l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) – mais aussi certaines techniques d'accès multiple moins courantes.

On examinera enfin les principaux aspects des types de répéteurs de satellite actuels et futurs ainsi que leurs conséquences sur les techniques de modulation et d'accès multiple.

Aucun système à accès multiple ne peut satisfaire à toutes les conditions éventuellement imposées à l'exploitant d'un tel système. Dans la plupart des réseaux, on peut constater que la configuration optimale utilisera plusieurs techniques différentes d'accès multiple. En général, pour l'optimalisation d'un système typique, il y a lieu de tenir compte des caractéristiques suivantes:

- capacité;
- efficacité d'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques;
- rendement d'utilisation de la puissance rayonnée par les satellites;
- possibilités d'interconnexion requises;
- adaptabilité aux variations de trafic et aux changements de réseau;
- aptitude à écouler des trafics de types divers;
- problème de jonction avec les liaisons de Terre;
- rentabilité.

On constate dans la plupart des cas que, pour organiser un réseau le mieux possible, il faut employer une pluralité de techniques d'accès multiple.

2. Signaux de la bande de base et traitements correspondants

2.1 *Signaux de la bande de base et conditions requises du service*

Dans le service mobile par satellite, on peut reconnaître quatre services distincts qui sont assurés normalement sur des circuits par satellite:

- téléphonie;
- échange de programmes de télévision;
- échange de programmes radiophoniques;
- transmission de données.

La qualité du fonctionnement des circuits internationaux pour ces services est étudiée sans relâche par le CCITT et le CCIR. Des circuits fictifs de référence ont été définis pour la téléphonie et la télévision (Avis 352 du CCIR) et pour l'échange de programmes radiophoniques (Avis 502 du CCIR, Avis J.11 du CCITT). On a besoin aussi d'un circuit fictif de référence pour la transmission de données, en raison notamment de la rapidité à laquelle se développent les réseaux spéciaux pour données, où l'on pourrait emprunter le secteur spatial pour une partie au moins d'une liaison de données.

Des Avis sur les critères de qualité pour une liaison par satellite ont été adoptés au CCIR pour les services les plus courants:

- téléphonie avec multiplexage par répartition en fréquence (MRF): Avis 353;
- téléphonie en MIC: Avis 522;
- télévision en modulation analogique: Avis 567;
- échange de programmes radiophoniques en modulation analogique: Avis 505.

2.2 *Traitement de la bande de base*

Il arrive que les signaux modulants utilisés pour assurer les services mentionnés au § 2.1 aient subi un traitement préalable. Celui-ci peut être inhérent aux méthodes de transmission employées sur les liaisons d'interconnexion de Terre. Il pourrait se faire aussi qu'on l'ait employé pour améliorer le fonctionnement du réseau à satellite. Dans un cas comme dans l'autre, l'application d'un traitement à la bande de base peut améliorer notablement l'utilisation du réseau à satellite et, par conséquent, réduire considérablement le coût d'un circuit par satellite.

Certaines des méthodes les plus importantes employées pour traiter un signal modulant sont les suivantes:

2.2.1 *Compression-extension*

Le compresseur-extenseur est un exemple d'une combinaison d'organes non linéaires susceptibles de se comporter de façon linéaire lorsqu'ils sont vus des bornes d'entrée et de sortie. On peut distinguer les compresseurs-extenseurs instantanés et les compresseurs-extenseurs syllabiques. Les compresseurs et les extenseurs instantanés sont des dispositifs non linéaires sans mémoire qui peuvent être représentés par des caractéristiques de la forme:

$$r(t) = F[s(t)]$$

$r(t)$ et $s(t)$ désignant respectivement le signal de sortie et le signal d'entrée et $F[s(t)]$ étant la fonction d'expression.

Avec les compresseurs-extenseurs instantanés, on se heurte à une difficulté, à savoir que l'onde comprimée doit être transmise sur la voie sans distorsion du signal, sinon la fonction d'expression ne permettrait pas de restituer $s(t)$. La largeur de bande occupée par $F[s(t)]$ est généralement supérieure à celle de $s(t)$, car un traitement non linéaire appliqué à des composantes sinusoïdales donne lieu à des harmoniques ainsi qu'à des produits d'intermodulation (sommes et différences) qui tombent en dehors de la bande initiale.

Dans un compresseur-extenseur syllabique, les variations de gain s'opèrent lentement, sous la commande de l'enveloppe du signal de conversation et non plus de ses valeurs instantanées. La bande du signal comprimé n'est que légèrement élargie et aucune condition nouvelle n'est imposée à la préservation de la forme du signal. On peut représenter le fonctionnement d'un tel organe en considérant le cas théorique où un signal est représenté pendant un intervalle fini par une onde sinusoïdale, soit:

$$s(t) = A \cos \omega t$$

Un compresseur-extenseur syllabique donne à ce signal une réponse de la forme $F(A) \cos \omega t$, alors qu'un compresseur-extenseur instantané y répondrait selon la loi $F(A \cos \omega t)$. Le compresseur-extenseur syllabique présente l'avantage de ne produire aucun harmonique de ω. Si A varie lentement avec le temps, il y a uniquement un léger étalement du spectre du signal comprimé de part et d'autre de la fréquence ω.

2.2.2 *Commande par la voix*

Dans une transmission téléphonique, on peut améliorer quelque peu le rapport de la largeur de bande à la puissance en s'arrangeant pour qu'une voie téléphonique ne soit connectée à une voie de transmission (par satellite) qu'en présence d'un signal vocal (par exemple, concentration de la parole). On peut également maintenir l'association voie téléphonique-voie de transmission pendant la durée d'une

communication téléphonique, mais retirer la voie de transmission du réseau à satellite au moment des pauses qui se produisent dans les signaux vocaux (par exemple, SPADE – Single channel per carrier PCM multiple Access Demand assignment Equipment (équipement MIC pour assignation en fonction de la demande avec une seule voie par porteuse)). Le dispositif essentiel à la mise en œuvre de tels systèmes est le commutateur commandé par la voix, dont on choisit soigneusement les caractéristiques pour que ce traitement soit aussi profitable que possible aux systèmes tout en évitant une dégradation perceptible de la qualité de la parole [Richards, 1973]. Les caractéristiques fondamentales d'un commutateur commandé par la voix sont représentées à la Fig. 1, dans laquelle:

V_{th}: seuil qu'on suppose être toujours dépassé par le niveau de la puissance vocale (ce seuil est généralement compris entre -35 et -40 dBm0 dans le cas d'un commutateur à seuil fixe);

T_0: délai de fonctionnement du commutateur commandé par la voix, c'est-à-dire temps qu'il met à détecter un son vocal (généralement, entre 6 et 10 ms);

T_H: durée de maintien, c'est-à-dire temps pendant lequel le commutateur commandé par la voix reste à l'état actif après cessation d'une salve de sons vocaux sur une voie téléphonique (généralement, entre 150 et 200 ms).

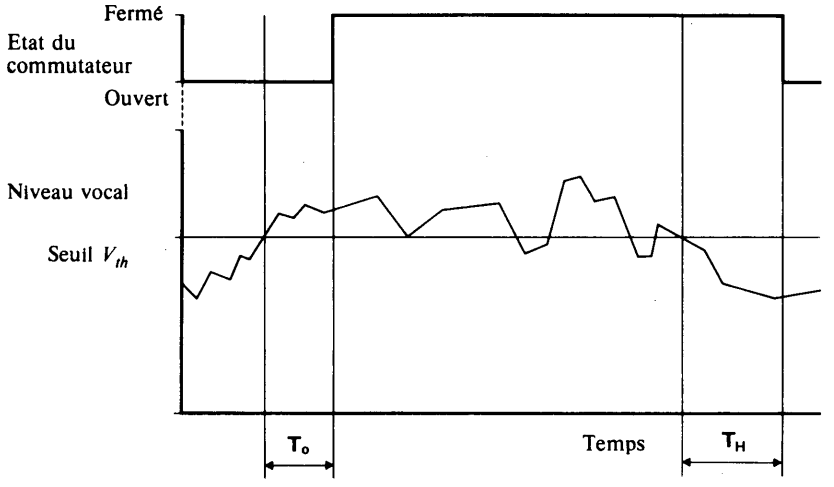


FIGURE 1 – *Caractéristiques d'un commutateur commandé par la voix*

Il est nécessaire de fixer le seuil V_{th} à un niveau assez bas si l'on veut éviter de perdre une grande partie du début d'une salve de sons vocaux (mutilation de la parole) et une grande proportion des sons vocaux de bas niveau. Si cette condition est satisfaite, le commutateur commandé par la voix répond aux niveaux de bruit élevés, ce qui diminue l'avantage net que le système retire de ce traitement.

Cependant, on a mis au point une nouvelle génération de commutateurs commandés par la voix, qui sont très peu sensibles au bruit, c'est-à-dire que la mutilation causée à la parole par le bruit y est minime. Le seuil du niveau de commande par les sons vocaux y est régulé par le niveau même du bruit; ces commutateurs sont destinés à traiter des signaux téléphoniques numéralisés [Jankowski, 1976].

Le réglage de la transmission des signaux téléphoniques au moyen de commutateurs commandés par la voix a trouvé une application pratique dans les systèmes avec concentration de la parole et dans les systèmes à une seule voie par porteuse tels que le SPADE [Werth, 1969]; cette technique a donné des résultats intéressants pour le traitement des signaux.

2.2.3 *Concentration des conversations*

Les techniques dites de concentration des conversations (CC) sont fondées sur le principe suivant: dans une conversation normale bilatérale, chaque interlocuteur occupe en fait le circuit pendant environ la moitié du temps seulement. De plus, il y a des pauses entre les syllabes, les mots et les phrases qui prolongent le temps mort, de sorte que dans une voie téléphonique unilatérale normale, la voie n'est active en moyenne que pendant 35 à 40% du temps pendant lequel la ligne est connectée [Bullington et Fraser, 1959].

Il s'ensuit que si la même voie de transmission peut être assignée à différentes personnes seulement pendant qu'elles parlent, l'utilisation de la voie devient plus efficace. On gagne ainsi notablement sur le nombre de conversations que l'on peut écouter sur une même voie pendant un temps donné, d'où un gain de capacité d'écoulement du trafic [Bullington et Fraser, 1959]. Le gain théorique que procure la concentration des conversations (G) est défini par le rapport du nombre d'interlocuteurs (circuits d'entrée, N_t) au nombre de voies de transmission (N_c) nécessaires pour les desservir.

Pour les systèmes analogiques tels que le système MRF-MF, l'augmentation de la charge des voies due au procédé de concentration des conversations exige une augmentation de la largeur de bande sensiblement proportionnelle à la racine carrée de l'augmentation du facteur d'activité ou un accroissement proportionnel de la puissance, mais, pour les systèmes numériques tels que le système MRT-MIC-MDP, le gain total de capacité du système utilisant la concentration des conversations n'exige aucune augmentation de largeur de bande ni de puissance. Donc, toutes choses égales d'ailleurs, le gain net de capacité apporté à un système MRT-MIC-MDP par la concentration de la conversation est plus élevé que si cette technique est appliquée à un système MRF-MF [Lyghounis et Costa, 1971].

La technique de concentration des conversations connaît plusieurs modes d'application, décrits dans l'Annexe I pour le cas d'un système numérique.

2.2.4 *Modulation par impulsions et codage (MIC)*

Selon la méthode MIC, le signal modulant est échantillonné périodiquement et quantifié d'une manière conventionnelle. En général, le traitement d'un signal téléphonique en MIC comporte une compression-extension. L'Avis G.711 du CCITT spécifie le format MIC à employer pour les signaux téléphoniques transmis sur des communications internationales. La cadence d'échantillonnage est de 8000 échantillons par seconde et, comme chaque échantillon est codé en 8 bits, le débit binaire total résultant est de 64 kbit/s par voie téléphonique. Le mode MIC à 8 bits est conçu pour pouvoir être appliqué à un maximum de 14 systèmes MIC en cascade. Il existe toutefois un autre mode MIC qui s'utilise dans les systèmes INTELSAT à une seule voie par porteuse (SCPC).

Un taux d'échantillonnage de 8000 échantillons par seconde et une norme de codage à 7 bits par échantillon sont utilisés dans ce système, donnant un débit binaire de transmission de 56 kbit/s par voie. La commande par la voix est renforcée et chaque salve de signaux vocaux est synchronisée séparément. La synchronisation initiale se fait par transmission d'une séquence de bits de la porteuse et de rétablissement de rythme (préambule), au début d'une salve de signaux vocaux. La synchronisation des trames pour l'échantillonnage est assurée par l'utilisation d'un mot spécial de synchronisation transmis à intervalles réguliers pendant la salve des signaux vocaux. Dans ce système, le débit numérique brut par voie est de 64 kbit/s. On estime que la qualité d'une connexion SCPC fonctionnant avec 7 bits au lieu de 8 est suffisamment bonne. En effet, comme la distance orthodromique entre la station terrienne émettrice et la station terrienne réceptrice à la surface de la Terre est grande, la probabilité pour que plus de quatre systèmes soient associés en cascade est négligeable [Puente et autres, 1971].

Une autre application de la MIC est le codage-décodage direct d'un signal multiplexé par répartition en fréquence (MRF). L'occasion de le faire a des chances de se présenter à l'échelon du groupe secondaire ou un échelon supérieur. Il n'existe pas de norme internationale pour coder un signal MRF. Néanmoins, on estime qu'un codage selon une loi linéaire, qui utiliserait 9 bits par échantillon, conviendrait à un système MRF-MIC.

2.2.5 *Modulation delta (MD)*

La MD est un moyen qui permet de réduire encore la largeur de bande requise pour établir une communication téléphonique, en tirant parti de la corrélation entre échantillons pour supprimer la redondance. Il existe de nombreuses façons de mettre en œuvre la MD, le rapport signal/bruit étant amélioré par l'emploi de méthodes adaptatives. On trouvera dans [Jayant, 1974] une comparaison entre les différents procédés de codage numérique d'un signal téléphonique.

Dans la modulation delta, le signal analogique est échantillonné à une cadence généralement comprise entre 24 et 40 kHz, pour des signaux vocaux de bonne qualité, avec utilisation d'un code à un bit pour transmettre le changement du niveau d'entrée entre les échantillons.

L'influence des erreurs de transmission dans un système à modulation delta n'est pas aussi grave que dans un système MIC. La raison en est que, dans le système à modulation delta, les bits transmis sont pondérés également et sont équivalents au bit de moindre poids d'un système MIC. Pour des débits binaires d'un même ordre de grandeur, inférieurs à 40 kbit/s environ, la modulation delta donne de meilleurs résultats que la MIC.

Le principal inconvénient des systèmes MD est qu'ils sont difficiles à interconnecter de façon générale dans un réseau international comprenant des liaisons analogiques et numériques.

2.2.6 *Modulation par impulsions et codage différentielle (MIC différentielle)*

La MIC différentielle peut être utilisée pour le codage des signaux sonores ainsi que pour le codage du signal de télévision.

On obtient un codage efficace des signaux vocaux en recourant à la MIC différentielle adaptable (MIC-DA). Le principe de la MIC adaptable est semblable à celui de la modulation delta adaptable (MDA). La principale différence est que le «signal d'erreur» (différence entre le signal à l'entrée du système et le signal à une sortie du dispositif de prévision) dans un système MDA est codifié à l'aide d'un seul bit, à un taux d'échantillonnage élevé, alors que dans un système MIC adaptable il peut être codifié à l'aide de quatre bits, à la fréquence d'échantillonnage qui sert généralement à la MIC (8 kHz); de ce fait, la conversion de la MIC en MIC adaptable est assez simple.

L'échelon de quantification du codeur est réglé automatiquement en fonction du signal émis seulement; il en résulte que le récepteur n'a pas besoin d'information supplémentaire pour régler le décodeur.

Les caractéristiques de fonctionnement d'un tel système ont été évaluées grâce à des mesures objectives et subjectives approfondies effectuées en Italie [Copperi et autres, 1975]. Les résultats ont démontré que, avec la MIC adaptable, un signal téléphonique peut être émis à un débit de 32 kbit/s, avec la même qualité subjective que celle qui est obtenue avec un signal MIC normalisé au taux de 64 kbit/s; l'amélioration du débit binaire est donc du simple au double. En outre, un système MIC adaptable à 32 kbit/s peut transmettre des données dans la bande vocale à un débit allant jusqu'à 2400 bit/s, soit la même qualité de fonctionnement que celle qui est obtenue avec un système MIC à 64 kbit/s.

2.2.7 *Compression-extension presque instantanée (NIC)*

La compression-extension presque instantanée est une technique de codage à la source permettant de réduire le débit binaire nécessaire aux transmissions MIC [Duttweiler et Messerschmitt, 1976]. On peut la réaliser en modifiant l'échelle de la gamme de quantification d'un bloc d'échantillons MIC, selon la grandeur de l'échantillon le plus grand du bloc. L'information relative à la nouvelle échelle est transmise sous la forme d'un mot de commande correspondant au bloc des échantillons. Le récepteur utilise le mot de commande pour mettre le train de bits reçu sous la forme MIC normale.

Des équipements récemment décrits transmettent des signaux vocaux à 35 kbit/s par voie et des données dans la bande des fréquences vocales à des débits atteignant 4,8 kbit/s [Niwa et autres, 1979].

2.2.8 *Codage pour la protection contre les erreurs*

Les deux principaux types de protection contre les erreurs sont la correction des erreurs vers l'avant ou sans voie de retour (FEC), qui utilise un code de correction automatique des erreurs, et la demande automatique de répétition (ARQ), qui utilise un code de détection des erreurs, ainsi qu'une voie auxiliaire d'information en retour pour déclencher la réémission de tout bloc de bits erroné à la réception. La première méthode, FEC, convient mieux pour la téléphonie, mais la seconde, ARQ, peut être intéressante dans d'autres applications, par exemple la transmission de données.

Le choix d'un code FEC pour une application particulière est influencé par les conditions d'erreurs sur les bits qui affecteraient vraisemblablement la liaison en l'absence de protection contre les erreurs. Cela est dû au fait que, en pratique, la plupart des codes tendent à augmenter le taux d'erreur sur une liaison donnée quand ce taux dépasse un certain seuil correspondant au code considéré. En général, le taux d'erreur où ce seuil se produit augmente en même temps que la complexité du code. C'est ce qu'illustre la Fig. 2 pour un code BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem) capable de corriger, dans un cas, une erreur et, dans l'autre, deux erreurs dans un bloc de 127 bits contenant des données.

L'emploi des codes FEC à convolution se répand dans les systèmes à satellites [Heller et Jacobs, 1971]. La Fig. 3 illustre les avantages théoriques de trois codes de cette classe:

- codage à convolution 7/8 avec décodage à décision stricte;
- codage à convolution 3/4 avec décodage à décision stricte;
- codage à convolution 1/2 avec décodage Viterbi [Heller et Jacobs, 1971].

En parcourant la Fig. 3 de la droite vers la gauche sur une horizontale, on voit apparaître la réduction du rapport de contraste énergétique E_b/N_0 requis pour maintenir le taux d'erreur à une valeur donnée. De même, si l'on parcourt la Fig. 3 du haut vers le bas sur une verticale, on voit apparaître la diminution du taux d'erreur qu'on obtient sur une liaison donnée en appliquant un codage FEC. On peut donc se servir du codage FEC pour régler le taux d'erreur d'une liaison donnée à la valeur souhaitée.

En particulier, on pourra améliorer ainsi la qualité de transmission de la liaison quand les conditions de propagation sont mauvaises. Le code de correction des erreurs est alors employé pour maintenir les performances d'un système au niveau requis (voir le Rapport 552, Annexe II). On pourrait dans ce cas établir un compromis entre la capacité supplémentaire en bits à prévoir pour la correction des erreurs et la diminution du débit dans le système – c'est-à-dire qu'on pourrait refuser l'accès pour cause d'occupation à des circuits qui se présentent – et utiliser les bits supplémentaires dont on disposerait pour augmenter la protection contre les erreurs sur les circuits restants [Gordon et autres, 1974].

3. Méthodes de modulation

Pour transmettre à un satellite des signaux de la bande de base, il faut leur faire moduler des ondes porteuses à fréquences radioélectriques. On examinera dans ce Rapport plusieurs méthodes de modulation courantes:

3.1 *Modulation de fréquence (MF)*

La méthode MF est celle qu'on utilise le plus souvent pour transmettre des signaux aux hyperfréquences. Pour l'usager du secteur spatial, elle permet de faire un compromis entre l'utilisation de la puissance disponible et la largeur de bande disponible, en augmentant l'excursion de fréquence. S'il y a une seule porteuse par répéteur de satellite, le fait que l'enveloppe du signal MF est invariable permet de faire fonctionner les amplificateurs de puissance à la saturation et d'utiliser ainsi au maximum la puissance disponible.

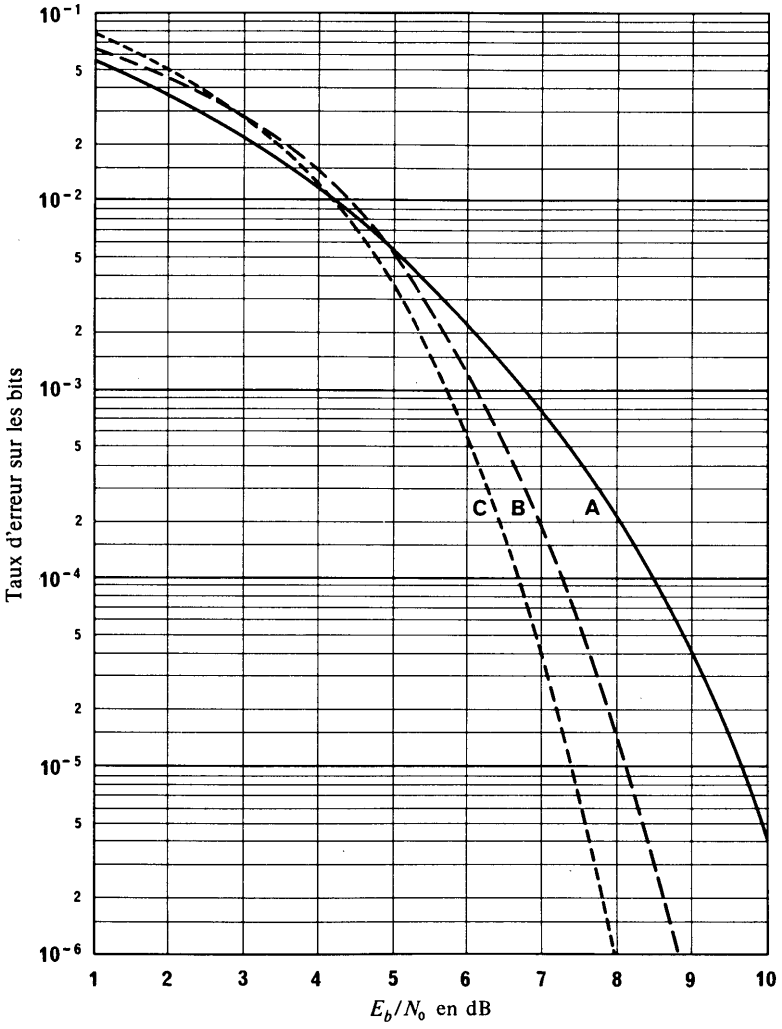


FIGURE 2 — *Amélioration apportée par l'emploi d'un code complet BCH appliqué à un bloc de 127 bits*

Courbes A: Absence de codage
B: Code de correction d'une erreur sur les bits (120 bits d'information, 7 bits de parité)
C: Code de correction de deux erreurs sur les bits (113 bits d'information, 14 bits de parité)

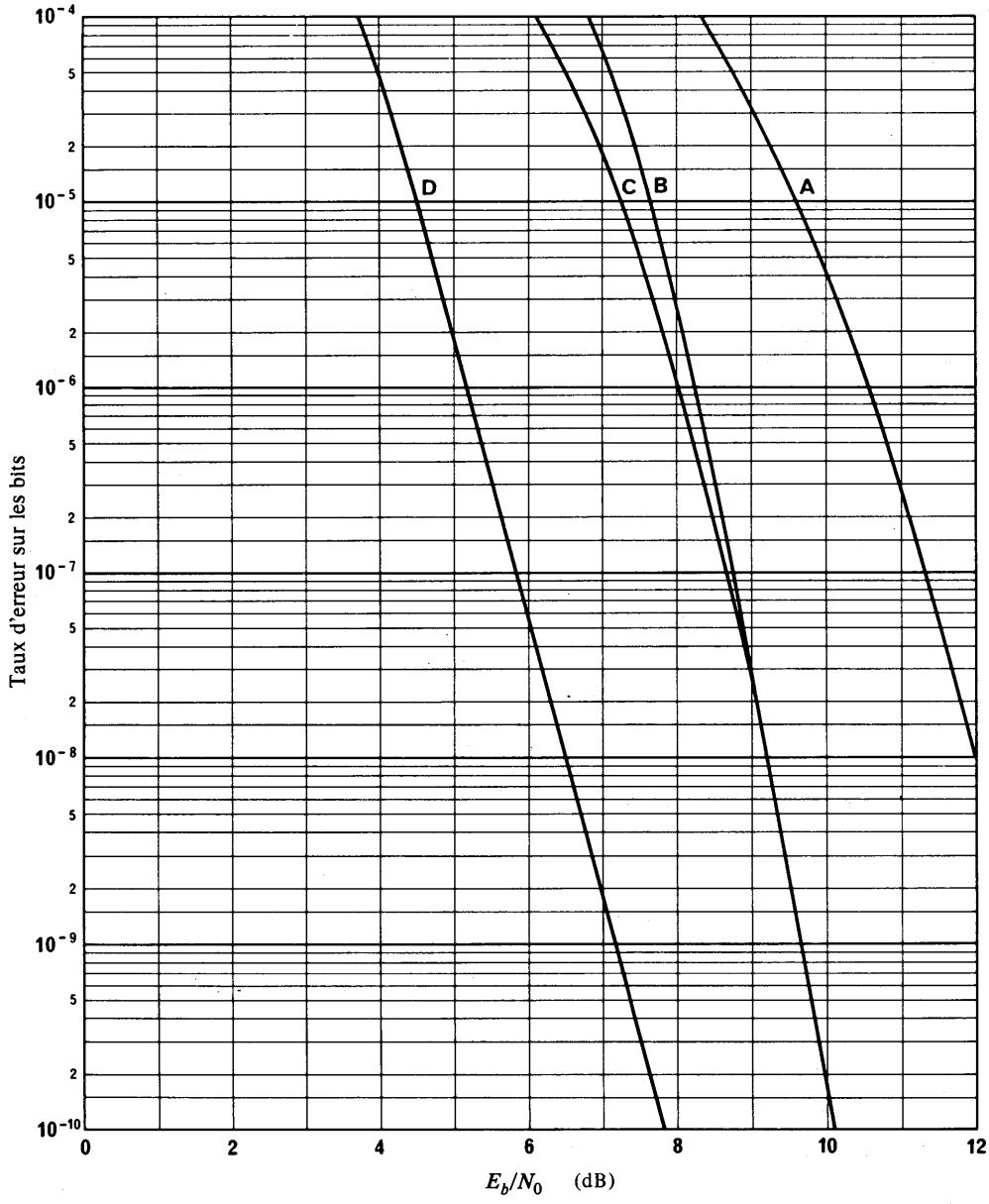


FIGURE 3 — *Amélioration apportée par l'emploi de différents codes de protection contre les erreurs sur les bits*

Courbes A : Absence de codage
B : Codage 7/8
C : Codage 3/4
D : Codage 1/2

3.2 *Modulation par déplacement de phase (MDP)*

La méthode MDP permet de faire moduler efficacement une onde porteuse par un signal numérique. Dans une transmission à deux phases, on utilise une phase de la porteuse pour représenter l'un des deux états binaires et la phase à 180° de la première pour représenter l'autre état. A côté des transmissions MDP bivalentes, il en existe d'ordre supérieur. La MDP quadrivalente nécessite théoriquement la même puissance, mais la moitié de la largeur de bande, comme la MDP bivalente, pour une qualité de trajet donnée. Les systèmes MDP d'ordre supérieur (supérieur à quadrivalent) sont plus sensibles au bruit et ont donc besoin d'une puissance plus grande que les systèmes bivalents ou quadrivalents pour obtenir la même norme de qualité. Dans la plupart des applications, c'est la MDP quadrivalente qui constitue le compromis optimal entre la puissance et la largeur de bande.

La modulation binaire, bien qu'elle ne soit pas aussi efficace que la modulation quadrivalente pour ce qui est de l'utilisation du spectre, présente l'avantage de simplifier la conception du démodulateur, avantage qui peut être important dans les applications où le coût de la station terrienne doit être maintenu aussi bas que possible.

Lorsque plusieurs répéteurs de satellite contigus sont utilisés en même temps dans le même mode de transmission, les voies non linéaires constituées par les stations terriennes d'émission, le satellite et les stations terriennes de réception dégradent la qualité de deux manières: le signal subit une distorsion dans la bande, causée par la non-linéarité d'amplitude et par la conversion amplitude/phase; ces non-linéarités sont à l'origine d'un élargissement du spectre radioélectrique qui se traduit par un brouillage dans les voies adjacentes.

Le choix du filtrage des voies est critique parce qu'il influe sur tous les facteurs de brouillage. Le filtrage permet de limiter le brouillage entre voies mais influe notablement sur le phénomène d'élargissement du spectre. D'autre part, la distorsion subie par un signal passant dans les éléments non linéaires est fonction du filtrage et la puissance de bruit reçue dans le démodulateur est proportionnelle à la largeur de bande du filtre de réception.

Le choix des meilleurs paramètres de modulation et de filtrage FI dépend fortement des caractéristiques des voies (distorsion non linéaire, espacement entre voies, filtrage des répéteurs du satellite), ainsi que du type de démodulation utilisé: certaines conclusions valables pour un cas peuvent être fausses dans un autre. Une étude complète doit être faite pour chaque système de transmission numérique par satellite: on trouvera dans l'Annexe III un exemple concernant plusieurs méthodes de modulation binaire.

3.3 *Modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU)*

La modulation avec bande latérale unique est de conception simple et a le mérite de permettre l'emploi d'une largeur de bande minimale. Contrairement à la modulation de fréquence, sa puissance n'est pas soumise à une limitation (effet de seuil).

En revanche, la modulation BLU a certains inconvénients par rapport à la MF et la MDP; entre autres, elle nécessite un émetteur plus puissant qu'une modulation de fréquence à grande excursion, elle est plus vulnérable à la non-linéarité, elle exige une synchronisation de fréquence très précise – qui est particulièrement difficile à atteindre avec des satellites autres que géostationnaires; enfin, elle est plus vulnérable au brouillage qu'une modulation de fréquence à grande excursion et cause un plus fort brouillage quand un signal BLU pénètre dans une bande de base de la porteuse d'autres systèmes.

On peut envisager pour une transmission BLU la même répartition du bruit que pour une transmission MF; à noter cependant qu'en BLU il est parfois plus difficile d'assurer la linéarité nécessaire.

Dans un émetteur à bande latérale unique, il faut tenir compte à la fois de la puissance moyenne et de la puissance de crête. Le rapport de la tension de crête à la tension efficace d'un émetteur BLU varie approximativement entre 10 et 13 dB.

3.4 *Modulation mixte d'amplitude et de phase (MMAP)*

La modulation mixte d'amplitude et de phase comprend diverses sortes de modulations avec constellation bidimensionnelle (amplitude et phase) du signal. Elle peut s'appliquer en transmission de données analogiques et numériques. La modulation mixte d'amplitude et de phase offre les avantages d'une grande économie de largeur de bande et de puissance. L'amélioration du rapport signal/bruit en bande de base est obtenue moyennant l'introduction d'un seuil de démodulation. Cette méthode est plus sensible aux non-linéarités que la modulation de fréquence; elle se prête bien à l'exploitation avec plusieurs porteuses [Thomas et autres, 1975].

Un prototype de modem à modulation mixte d'amplitude et de phase à deux impulsions (MMAP 2), pour la téléphonie MRF à 120 voies, vient d'être mis au point et essayé sur une liaison empruntant un satellite Intelsat-IV de l'océan Pacifique [Welti, 1973; Chakraborty et autres, 1977]. Dans ce système de modulation, le signal téléphonique MRF est d'abord échantillonné à un taux approprié, puis quantifié au niveau le plus proche choisi parmi sept niveaux de tension possibles. On transmet une première impulsion de porteuse, correspondant à l'une des sept combinaisons possibles d'amplitude et de phase, pour représenter ce niveau approché. La différence entre l'échantillon de signal réel et son approximation est alors représentée par le plus voisin de trois niveaux possibles. Pour terminer, on mesure le reliquat. Une seconde impulsion de porteuse est formée par la combinaison d'une onde cosinusoïdale et d'une onde sinusoïdale. L'amplitude de la première a l'un des trois niveaux possibles mentionnés ci-dessus et l'amplitude de la seconde est proportionnelle au reliquat.

3.5 *Modulation d'amplitude en quadrature avec codage quadridimensionnel (MAQ-4D)*

Dans ce type de modulation, l'information est transmise sur des paires d'impulsions modulées en amplitude en quadrature liées. Le choix des combinaisons de niveau de phase et en quadrature de la seconde impulsion dépend du choix fait pour la première. Cette méthode permet une plus grande économie de largeur de bande que la modulation mixte d'amplitude et de phase (MMAP) avec toutefois un léger sacrifice en ce qui concerne la puissance requise [Welti, 1976].

4. Techniques d'accès multiple

4.1 *Considérations générales*

Dans un système du service fixe par satellite, chaque satellite joue le rôle d'une station relais et constitue un point nodal sur les circuits allant aux stations terriennes qui communiquent avec lui. Il contient une ou plusieurs chaînes de répéteurs, dont chacun est capable de transposer la fréquence des signaux reçus en provenance des stations terriennes du système, d'amplifier ces signaux et de les réémettre vers d'autres stations terriennes de ce système. Le nombre des chaînes de répéteurs que contient un satellite dépend du système considéré et résulte d'un compromis entre les conditions techniques et les contraintes économiques. De façon générale, la largeur de bande disponible par chaîne est plus grande que celle dont auraient besoin la plupart des stations terriennes pour leur exploitation propre. Il en résulte que, afin d'utiliser pleinement la capacité disponible des répéteurs, on laisse plusieurs stations terriennes accéder à une chaîne de répéteurs, que leur transmission soit à une seule ou plusieurs destinations. C'est cette utilisation d'une chaîne de répéteurs par plusieurs stations terriennes émettrices qu'on appelle l'«accès multiple».

La Fig. 4 représente un réseau général à accès multiple et la circulation des signaux dans un tel réseau. Dans l'équipement terminal d'accès multiple, on complète les signaux par une information d'adresse et on les traite pour les mettre dans le format de transmission utilisé dans le système à satellites. Suivant le système à accès multiple dont il s'agit, cet équipement terminal est plus ou moins perfectionné. Dans son mode d'exécution le plus simple, il ne serait autre qu'une connexion en câble du signal modulant vers une chaîne de transmission particulière comprenant notamment le modulateur, etc.

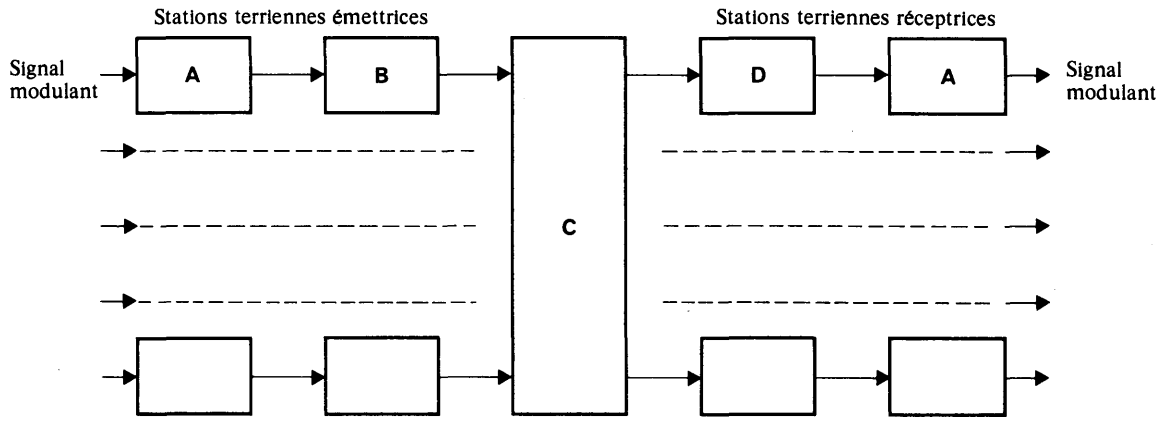


FIGURE 4 — *Schéma général de l'écoulement du signal modulant dans un système à accès multiple*

A: Terminal d'accès multiple
B: Emetteur
C: Répéteur du satellite
D: Récepteur

Un équipement terminal plus complexe pourrait être amené à exercer les fonctions suivantes:

- jonction avec un réseau de Terre;
- insertion et extraction des informations d'adresse et de système;
- dans les systèmes numériques, mémorisation temporaire des données pour tenir compte des variations de rythme et permettre les conversions de débit binaire;
- affectation de paquets d'information à des chaînes de transmission particulières (par exemple, pour les systèmes AMRT, voir le § 4.2.2).

Des signaux des types les plus divers sont transmis sur la même voie d'un répéteur de satellite. Théoriquement, la constitution de chaque signal émis doit être telle que:

- un récepteur puisse l'extraire du signal composite transmis sur la voie considérée;
- le brouillage qu'il peut causer aux autres signaux reçus après transmission sur la même voie soit aussi faible que possible [Schwartz et Munter, 1973].

Les techniques d'accès multiple peuvent se ranger en deux catégories. La première comprend celles où, en principe, les signaux ne se brouillent pas mutuellement. A cet effet, les signaux sont émis vers le satellite sur des ondes à polarisations orthogonales, de sorte que sur une voie idéale la détection d'un signal empêcherait automatiquement la détection des autres. Les techniques avec signaux ne se brouillent pas mutuellement, l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) et l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT).

L'autre catégorie comprend des techniques où il y a brouillage mutuel entre les signaux, mais où ce brouillage est suffisamment affaibli grâce au choix de caractéristiques appropriées pour les signaux. Les techniques correspondantes sont l'accès multiple par étalement du spectre (AMES) et l'accès multiple avec adresse par impulsions (AMAI).

Pour les applications générales de radiocommunication, on préfère les systèmes à accès multiple sans brouillage. De par leur conception, ils permettent d'utiliser la largeur de bande disponible plus complètement que les systèmes à accès multiple avec brouillage.

Une contrainte importante dans l'étude du matériel est le fait que la puissance dont on dispose à bord d'un satellite est limitée. On a donc tout intérêt à faire fonctionner l'amplificateur de puissance à un niveau de puissance aussi proche que possible du point de saturation. De même, à la station terrienne émettrice, il est souvent intéressant de faire fonctionner l'amplificateur de puissance au voisinage de son point de saturation. Cependant, dans un système à plusieurs porteuses par répéteur, il est nécessaire de réduire considérablement la puissance par rapport au point de saturation, afin de maintenir à un niveau suffisamment bas la distorsion due aux produits d'intermodulation.

L'une des méthodes permettant de relâcher cette nécessité de réduire la puissance consiste à faire accéder les porteuses au répéteur de façon séquentielle dans le temps, comme dans les systèmes AMRT où la méthode de modulation la mieux adaptée est la modulation par déplacement de phase (MDP). Toutefois, un signal MDP transmis dans un système à largeur de bande limitée présentera une modulation d'amplitude et subira donc une distorsion non linéaire dans l'amplificateur de puissance du satellite. La largeur de spectre du signal subissant cette distorsion est généralement plus grande que celle du signal. C'est la raison pour laquelle un système de multiplexage par répartition dans le temps pour l'accès multiple utilisant la modulation MDP peut subir une certaine dégradation due aux effets de non-linéarité se produisant dans le satellite et peut causer des brouillages dans les canaux radioélectriques adjacents. Selon la largeur de bande du filtre faisant suite à l'amplificateur de puissance, ce brouillage peut devenir le facteur de limitation de la qualité d'un système AMRF-MF fonctionnant sur un canal adjacent à un système AMRT-MDP.

4.2 *Description des systèmes*

4.2.1 *Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF)*

Jusqu'ici, la technique d'accès multiple la plus communément utilisée est l'AMRF. Selon cette technique, plusieurs porteuses, de fréquences distinctes, partagent une même chaîne de répéteurs d'un satellite.

La présence d'un tube à ondes progressives ou de tout autre amplificateur de puissance à point de saturation cause, à la qualité de transmission, des dégradations de divers types dont il faut tenir compte quand on étudie un système à accès multiple avec répartition en fréquence. Suivant le type de modulation qu'on emploie (MRF-MF, MIC-MDP, etc.), il convient d'optimiser les caractéristiques du répéteur du satellite de manière à réduire à un minimum l'intermodulation, la diaphonie intelligible et d'autres effets de brouillage causés par les non-linéarités d'amplitude et de phase du répéteur en fonction du nombre et de la capacité des porteuses devant accéder au répéteur. Pour maintenir ces dégradations au-dessous des limites spécifiées, on fait fonctionner le tube à ondes progressives à sa puissance d'entrée réduite au minimum compatible eu égard aux objectifs de qualité à atteindre. Un fonctionnement à plusieurs porteuses par répéteur entraîne toujours une diminution de la capacité disponible, par rapport à une exploitation à accès simple, par suite de la réduction imposée à la puissance.

La puissance émise par une station terrienne dépend du nombre des voies téléphoniques dont les signaux modulent la porteuse. Pour s'assurer que toutes les porteuses arrivent au répéteur avec des rapports de puissance appropriés, il est nécessaire, en exploitation à plusieurs porteuses, de régler la puissance de chacune des porteuses transmises par chaque station terrienne. Dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, les évanouissements dus aux précipitations peuvent être profonds, aussi devra-t-on recourir à des méthodes pour réguler la puissance si l'on veut obtenir la stabilité de puissance requise à l'entrée du satellite.

Les combinaisons de modulation employées sont nombreuses. Des exemples sont donnés ci-après:

4.2.1.1 *Multiplexage par répartition en fréquence et modulation de fréquence (MRF-MF)*

On a acquis une expérience considérable dans l'utilisation de porteuses MRF-MF dans les systèmes à accès multiple, que l'on conçoit actuellement de façon que leurs satellites aient la plus grande capacité possible, compte dûment tenu de toutes les dégradations correspondantes de la qualité de transmission.

Normalement, la capacité en voies d'un répéteur de satellite à porteuses MRF-MF varie en fonction du nombre d'accès et du schéma de distribution du trafic. Cette variation est subordonnée dans une certaine mesure aux contraintes imposées à la conception du système, qui portent aussi bien sur les caractéristiques des stations terriennes que sur celles des satellites. Un exemple typique est représenté dans le tableau ci-dessous, dans l'hypothèse que toutes les stations terriennes ont des équipements de réception identiques.

TABLEAU I

Nombre de porteuses par répéteur	Capacité en voies rapportée à celle d'une exploitation à une seule porteuse (%)
1	100
2	90
4	60
8	50
16	40

4.2.1.2 *Une seule voie par porteuse (SCPC)*

Dans un système SCPC, chaque porteuse est modulée par le signal d'une seule voie téléphonique, qui peut être traitée de différentes façons. Les systèmes SCPC habituels utilisent une compression-extension avec modulation de fréquence (CMF) [Evans et Kernot, 1975], modulation delta (MD) ou modulation par impulsions et codage (MIC).

Des systèmes SCPC-CMF sont en usage en différents endroits, par exemple en Algérie et en Alaska. Le comportement des démodulateurs, quant à l'effet de seuil, impose une limitation à l'exploitation s'il s'agit d'un système à modulation de fréquence. On étudie actuellement l'application de méthodes permettant d'abaisser le seuil dans un système SCPC.

Pour le service téléphonique, les systèmes SCPC-MD-MDP ont plusieurs avantages propres, mais quelques inconvénients aussi. Ces techniques ont été appliquées à des systèmes en service. L'un d'eux fonctionne en MD-SCPC-AMRF pour les communications avec le grand Nord du Canada. Un autre système sert à communiquer avec les plates-formes pétrolières de la mer du Nord.

Le principal inconvénient de tels systèmes est qu'il est difficile de les interconnecter systématiquement dans un réseau international comprenant des liaisons analogiques et des liaisons MIC. Les deux systèmes susmentionnés s'appliquent à des circuits terminaux, où les signaux vocaux entrants sont numéralisés dans les stations terriennes.

Les systèmes SCPC-MIC-MDP sont maintenant très répandus. Un exemple représentatif est le système SCPC d'INTELSAT [Puente et autres, 1971]. Ce système peut fonctionner avec préassignation ou avec assignation en fonction de la demande (SPADE). La capacité maximale d'un répéteur à 36 MHz est de 800 porteuses espacées de 45 kHz les unes des autres.

4.2.1.3 *Multiplexage par répartition dans le temps – modulation par impulsions et codage – manipulation par déplacement de phase (MRT-MIC-MDP)*

Dans cette technique, une porteuse est modulée par un signal modulant qui appartient à la hiérarchie de multiplexage MIC. Le CCITT a adopté certains débits binaires et certains formats pour le réseau MIC international.

En vue de réduire à un minimum le coût et la complexité des équipements de jonction dans la station terrienne, il est avantageux de moduler les porteuses, dans la mesure du possible, directement par les signaux multiplexés MRT-MIC du réseau de Terre.

La jonction numérique directe correspondante est à l'étude au CCIR (Programme d'études 2N/4).

La technique MRT-MIC-MDP-AMRF a plusieurs avantages, en particulier celui de permettre à un utilisateur de mettre peu à peu en service des liaisons numériques sans avoir accès à un système AMRT complet (voir ci-dessous). D'autres avantages seraient:

- le doublement (approximativement) de la capacité par rapport à la technique MRT-MF, grâce à l'emploi de l'interpolation des signaux vocaux numériques;
- la compatibilité avec la technique MRT-MF dans un même répéteur [Davis et Fang, 1975].

4.2.2 *Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT)*

L'AMRT est une technique d'accès multiple selon laquelle les stations terriennes communiquent les unes avec les autres en faisant de brèves émissions sans chevauchement, par l'intermédiaire du répéteur d'un satellite du système. Les signaux modulants peuvent être de nombreux types, mais il est nécessaire de les convertir en signaux numériques avant de moduler la porteuse. La technique AMRT ne convient donc qu'à la transmission de signaux numériques tels que des signaux MRT-MIC utilisés en téléphonie ou en téléinformatique. Elle est appliquée dans plusieurs systèmes à satellites, par exemple pour les voies de signalisation et d'information d'accès dans les systèmes SPADE et MARISAT [Lipke et Swearingen, 1974].

On considérera ici principalement les systèmes AMRT à MDP (cohérente) quadrivalente destinés à la téléphonie. De tels systèmes sont en service dans certains pays, par exemple au Canada, et en cours d'essai ailleurs.

Le multiplexage par répartition dans le temps pour l'accès multiple est caractérisé par la durée de l'intervalle de récurrence et de l'intervalle élémentaire (voir la Fig. 5). L'intervalle de temps élémentaire assigné à une station terrienne contient un temps de garde, un préambule et des données à transmettre. Le préambule contient des informations auxiliaires pour l'organisation du système telles que la synchronisation et les informations d'adresse. Le temps alloué à l'intervalle de garde et au préambule dépend étroitement du principe retenu pour l'organisation du système. Le message peut se composer d'un certain nombre de voies élémentaires de base. Une voie élémentaire de base peut être un échantillon codé de voie téléphonique ou un autre signal numérique de bande de base. Dans un système de service fixe par satellite utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps, on peut assigner à chaque station participante plus d'un intervalle de temps élémentaire. Une séquence complète d'émission des stations terriennes constitue l'intervalle de récurrence. Les intervalles de temps élémentaires peuvent différer d'une station à l'autre suivant les volumes de trafic qu'elles doivent acheminer. La durée de l'intervalle de temps élémentaire est limitée par la durée de transmission maximale admissible.

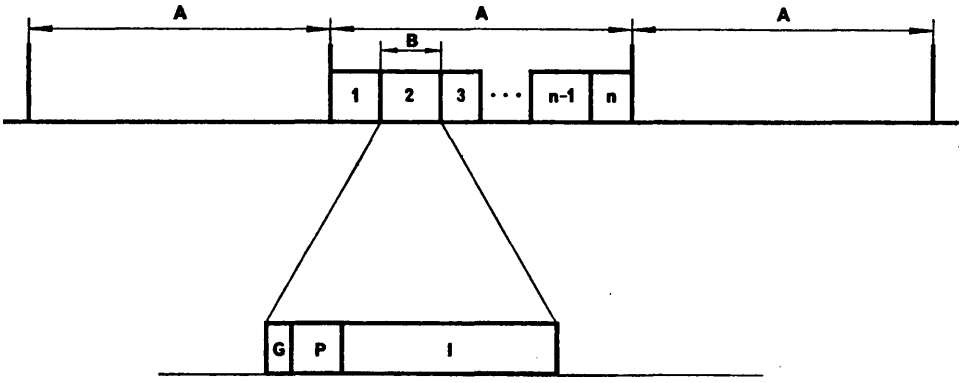


FIGURE 5 — *Format d'un système d'accès multiple par répartition dans le temps*

A: Intervalle de temps de récurrence
B: Intervalle de temps élémentaire assigné à une station terrienne — à l'intérieur de l'intervalle de temps élémentaire, la station terrienne émet des impulsions de données par rafales
G: Temps de garde séparant les émissions successives de deux stations terriennes
P: Préambule contenant les informations auxiliaires nécessaires à l'organisation du réseau
I: Informations

Le récepteur d'une station terrienne identifie le signal qui lui est destiné en observant les informations contenues dans les intervalles de temps élémentaires récurrents associés aux stations terriennes correspondantes. La bande passante nécessaire au système est minimale quand les fréquences des porteuses des stations terriennes sont les mêmes.

La durée minimale de l'intervalle de temps qui peut être assigné à une station terrienne donnée dépend des problèmes de synchronisation et de répartition de temps. Compte tenu de cette limitation, à quoi s'ajoute la nécessité de comprimer dans le temps les signaux de bande de base pour l'émission discontinue, on est amené à définir une méthode de division du temps dans laquelle des impulsions correspondant à plus d'un échantillon d'une voie téléphonique peuvent être émises durant chaque intervalle élémentaire. Le contenu de l'intervalle élémentaire est limité exclusivement par les types de

modulation pouvant être transmis dans cet intervalle. Le temps de propagation est le principal facteur de retard dans le cas du satellite géostationnaire. C'est pourquoi, dans ce cas, on ne peut pas admettre, pour les systèmes transmettant des voies téléphoniques, que d'autres sources introduisent des retards égaux à une fraction notable du temps de transmission. Cette considération détermine une valeur maximale pour l'intervalle de récurrence. Dans la pratique toutefois, du point de vue de l'efficacité d'accès par rapport au coût d'une mémoire dans un système à accès multiple, une optimisation de l'intervalle de récurrence, dans les conditions actuelles, aurait pour conséquence que la valeur de ces intervalles serait très inférieure à la valeur maximale mentionnée ci-dessus. On trouvera ci-dessous à ce sujet une description concernant un système à plusieurs intervalles.

Dans l'étude qui suit, sur l'accès multiple à répartition dans le temps, on supposera que l'information a été échantillonnée et mise sous forme d'impulsions.

Dans les systèmes AMRT, les exigences relatives au préambule se traduisent par une diminution de la capacité téléphonique disponible, il s'ensuit que l'efficacité de trame (ε), définie comme étant le rapport de la capacité de trame utilisable à la capacité disponible, décroît à mesure qu'augmente le nombre de stations du système, comme le montre la Fig. 6. Une méthode permettant de limiter cette perte d'efficacité consiste à allonger la durée de la trame en utilisant des circuits de mémoire intermédiaire. Ce mode d'exploitation, dit «multitrame», offre d'autant plus d'avantages que le nombre de stations par trame est plus grand et que les préambules par station sont plus longs. Par ailleurs, un système avec un fonctionnement à rythme cohérent parmi les intervalles élémentaires attribués à une station terrienne donnée permet des préambules plus courts, ce qui a également pour effet d'augmenter l'efficacité de trame [Takada et Doi, 1969]. D'une façon générale, l'efficacité de la trame augmente progressivement à mesure que la durée de la trame AMRT augmente, comme indiqué aux Fig. 6 et 7 [Quaglione et autres, 1972]. On voit que le point à partir duquel cette augmentation devient insignifiante dépend de la longueur du préambule et du nombre de stations dans le système. Dans la pratique, la longueur optimale de la trame AMRT est déterminée, pour un système donné, autant par les conditions requises pour l'exploitation et pour l'équipement du secteur terrien que par la nécessité d'obtenir une efficacité de trame élevée.

On a prévu dans les systèmes AMRT un signal de rythme de référence. Ce signal de référence pour les trames est généralement émis par une station terrienne choisie à cet effet, et il est transmis aux autres stations terriennes par le relais d'un satellite.

Les intervalles élémentaires sont synchronisés par référence aux intervalles de récurrence par correction des variations du temps de propagation dues aux variations de longueur du trajet, à un rythme égal à la dérivée du temps de propagation sur le trajet. Cela peut se faire en extrayant du signal AMRT reçu l'erreur de base de temps du signal émis par une station terrienne et retransmis à cette dernière par l'intermédiaire d'un satellite. Toutefois, cette condition ne peut pas être remplie lorsque le système AMRT ne fonctionne qu'avec une antenne de satellite à faisceau étroit. Dans ce cas, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour assurer la synchronisation; ce sont les suivantes:

- l'erreur de base de temps peut être mesurée à la station terrienne de destination et retransmise à la station terrienne émettrice;
- si les équipements terminaux AMRT d'une station terrienne fonctionnent avec une antenne à couverture globale aussi bien qu'avec une antenne à faisceau étroit, l'erreur de base de temps peut être déduite de l'équipement terminal AMRT qui fonctionne avec l'antenne de satellite à couverture globale. La base de temps du signal AMRT transmis avec l'antenne à faisceau étroit peut être asservie à celle transmise par l'antenne à couverture globale en adoptant une synchronisation des intervalles de récurrence communs sur l'ensemble du système AMRT.

  L'information de rythme se détermine soit au moyen d'une salve AMRT soit au moyen d'une porteuse distincte modulée en fréquence, qui utilise une petite partie de la capacité d'un répéteur AMRF équipé d'une antenne à couverture globale [White, 1975];
- la position précise du satellite est mesurée à la station de référence et cette information est transmise, avec la base de temps des intervalles de récurrence, à toutes les stations;
- la station terrienne détermine avec une grande précision son temps de propagation jusqu'au satellite avant de transmettre son signal et les stations sont synchronisées passivement [Nuspl, 1972].

Dans les systèmes pour radiocommunications numériques, on a intérêt à choisir les méthodes de modulation et de détection qui comportent le taux minimal d'erreur sur les bits pour une puissance donnée des satellites. A cet égard, la modulation MDP avec détection cohérente présente des avantages. Cependant, comme les signaux MDP sont émis dans le mode paquet et que les porteuses et les impulsions de synchronisation ne sont pas cohérentes les unes avec les autres d'une station terrienne à une autre, il est nécessaire au début de chaque paquet de rétablir la phase de la porteuse de référence, pour assurer une détection cohérente, et le rythme des impulsions d'horloge, pour permettre les prises de décision du signal.

Les exploitants de certains systèmes AMRT étudiés envisagent de régler le synchronisme par une horloge; on aurait alors moins besoin de bits supplémentaires pour le rétablissement du rythme binaire [Watanabe et Izumi, 1975]. Naturellement, il en résulterait aussi une augmentation du rendement de trame.

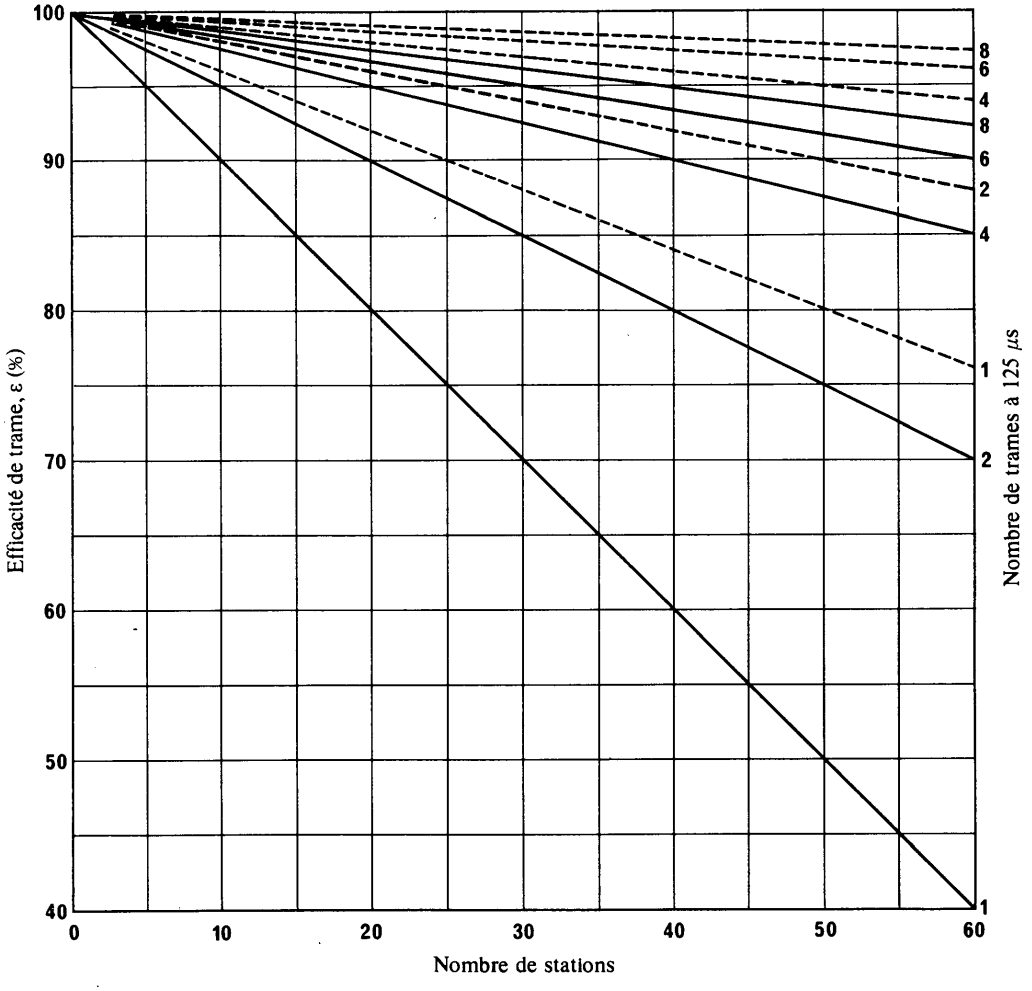


FIGURE 6 — *Efficacité de trame dans les systèmes AMRT*

——— Longueur du préambule: 40 symboles (80 bits) (fonctionnement asynchrone des horloges)

- - - - - - - - - Longueur du préambule: 16 symboles (32 bits) (fonctionnement cohérent des horloges)

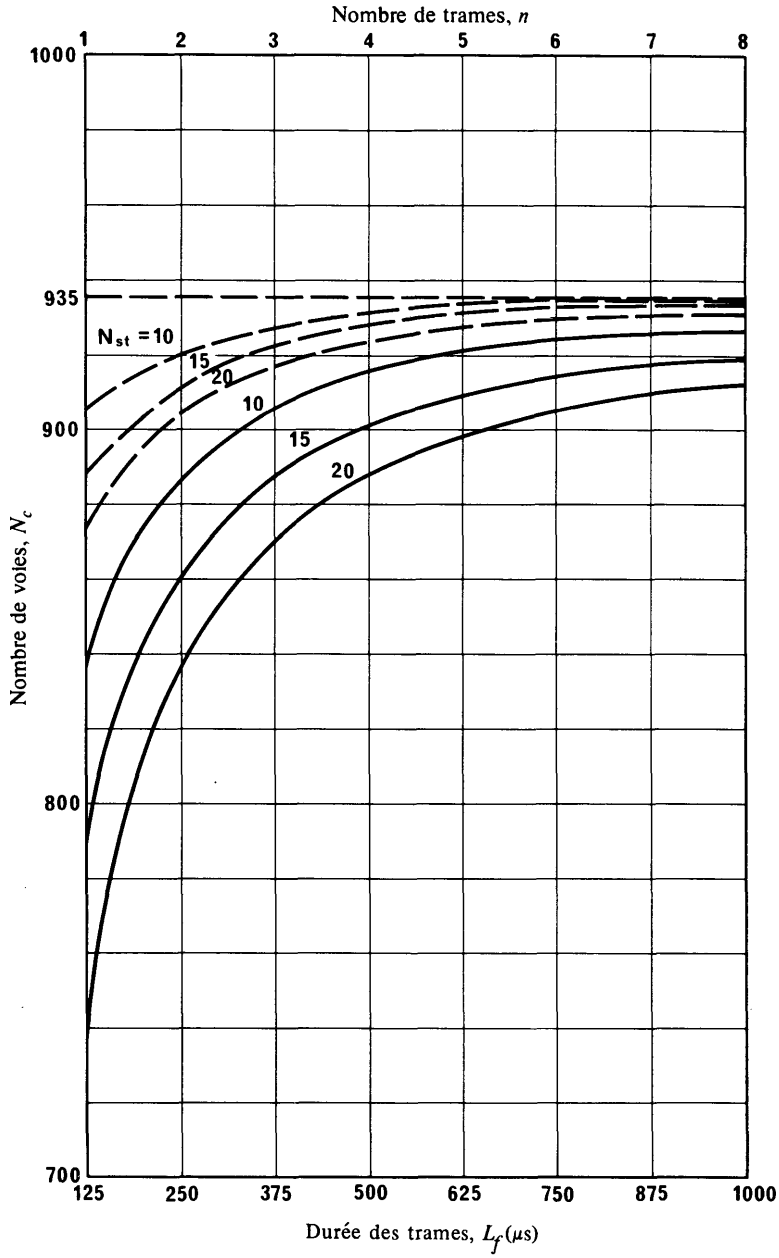


FIGURE 7 — *Capacité nette en voies d'un système AMRT avec un répéteur de satellite de 36 MHz, en fonction de la durée de la trame, L_f*

Débit binaire sur la liaison: 60 Mbit/s

N_{st}: nombre de stations sur le système

——— Longueur du préambule: 40 symboles (80 bits) (fonctionnement asynchrone des horloges)

– – – – Longueur du préambule: 16 symboles (32 bits) (fonctionnement cohérent des horloges)

La technique AMRT présente une variante particulièrement intéressante pour les antennes de satellite à faisceaux multiples; il s'agit de la technique «AMRT-CS» (AMRT-commutation à bord de satellite) [Muratani, 1974]. Cette technique consiste dans l'utilisation d'un dispositif de commutation par répartition dans le temps à bord du satellite (voir le § 5.2); ce dispositif, qui fonctionne en synchronisation avec les terminaux AMRT au sol, permet de diviser les paquets AMRT entrants en plusieurs sous-paquets qui sont dirigés vers le faisceau approprié de la liaison descendante.

4.2.2.1 *Souplesse d'écoulement du trafic par variation des longueurs de paquet*

Du point de vue de l'écoulement du trafic, un système AMRT est plus souple qu'un système AMRF. La transmission d'un paquet se fait au débit binaire utilisé dans le système AMRT. (Un inconvénient du système AMRT est que toutes les stations terriennes participantes doivent avoir une grande puissance d'émission, quelle que soit l'intensité du trafic.) Si une station terrienne a besoin de changer le nombre de ses voies de transmission, il lui suffit de modifier la longueur des paquets. Pour assurer la souplesse d'exploitation, notamment dans un système à assignation en fonction de la demande, où le nombre des voies de trafic par station terrienne peut varier, il faut établir une discipline générale pour chaque réseau. S'il s'agit d'un système centralisé, cette fonction peut être confiée à une station directrice du réseau; si le système est décentralisé, elle peut être exercée par toutes les stations terriennes du réseau selon un règlement fixé d'avance pour le réseau.

Qu'un réseau soit organisé dans un mode ou dans l'autre, ses stations terriennes participantes doivent pouvoir communiquer entre elles sur des lignes de service. Le temps alloué aux communications de service doit être très petit.

4.2.2.2 *Souplesse d'écoulement du trafic par variation de la rapidité du débit des paquets*

Au lieu de modifier la longueur des paquets d'une station terrienne lorsqu'il est nécessaire de changer la capacité d'écoulement du trafic de cette station, on a mis au point un système dans lequel les longueurs des paquets restent fixes alors que la rapidité avec laquelle ils sont émis est modifiée en fonction des variations de la demande en matière de trafic.

Tel qu'il est utilisé, ce système présente plusieurs avantages: les modems de compression de temps de toutes les stations terriennes peuvent être normalisés, un changement de capacité entre une paire de stations terriennes ne nécessite pas un réaménagement de toute la trame du système AMRT, enfin les fonctions de commande du système sont simplifiées.

La durée de la trame AMRT est fixée à 13,5 ms; les stations participant au trafic émettent des paquets d'information à des vitesses de sous-trame variant par bonds discrets dans la gamme de 0,5 à 4,5 ms en fonction de la capacité de trafic qui leur est demandée.

L'intervalle de temps de base pour un paquet, d'une durée de 62,5 µs, comprend deux parties: un intervalle de temps de 3,66 µs pour la synchronisation de trame du système, utilisant la transmission MDP bivalente, et un intervalle de temps de 58,84 µs pour l'information utilisant la transmission MDP multivalente. Dans la Fig. 8, la structure de paquet indiquée s'applique à une fréquence de rythme de 20,48 MHz.

Le système est conçu pour être utilisé dans un système AMRT à répéteurs classiques ou dans un système AMRT-CS à répéteurs commutés embarqués [Pankov et autres, 1979].

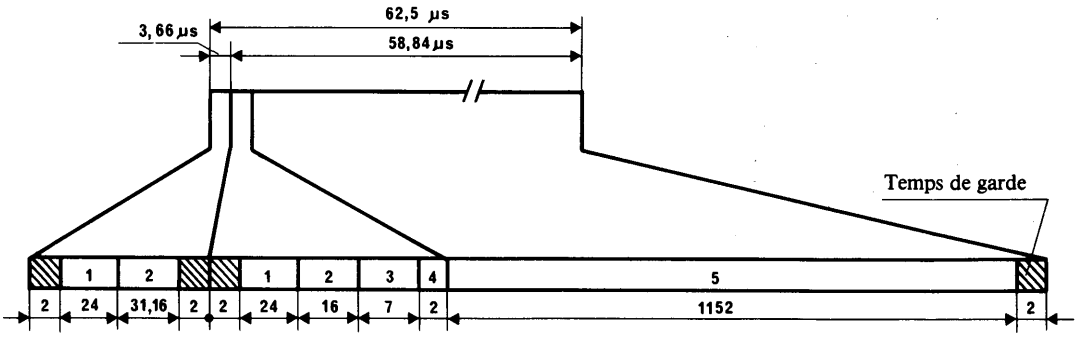


FIGURE 8 – *Structure du paquet principal de la trame pour une fréquence d'horloge de 20,48 MHz*

1: préambule du démodulateur
2: bit de départ
3: adresse de la station d'émission
4: type d'information
5: information

4.2.3 *Accès multiple à répartition dans le temps/accès multiple à répartition en fréquence (AMRT-AMRF)*

On a vu au § 4.2.2 que les stations terriennes AMRT classiques ont besoin de grandes quantités d'énergie. Il existe maintenant plusieurs systèmes AMRT qui utilisent la largeur de bande et la puissance des répéteurs en partage avec d'autres signaux. Ces systèmes ont des capacités adaptées aux services qu'ils assurent et à la qualité de fonctionnement requise. Ils conservent la souplesse d'exploitation propre à la technique AMRT et ils peuvent fonctionner avec une puissance réduite, moyennant une capacité totale plus faible des répéteurs. Ces systèmes AMRT-AMRF, à synchronisation en boucle ouverte ou fermée, sont de construction modulaire et présentent probablement une bonne rentabilité [Husted et Dinwiddy, 1978; Searle et Nuspl, 1980].

4.2.4 *Accès multiple par étalement du spectre (AMES)*

La technique AMES utilise un signal assimilable à un bruit aléatoire pour étaler le signal d'information à bande étroite sur une bande de fréquences relativement large. Pour reconstituer le signal d'information initial, le récepteur procède par corrélation avec cette opération. Comme l'étalement du spectre met en jeu un code choisi dans un ensemble de codes complexes, cette corrélation échouera si un signal entrant dans le récepteur a été codé selon un code différent. De même, comme les codes engendrés dans un système AMES ont le caractère d'un pseudo-bruit (PB), un code brouilleur est rejeté à raison du rapport de la largeur de bande du spectre étalé à la largeur de bande du signal d'information.

On trouvera dans les Rapports 651 et 652 respectivement des descriptions générales des techniques de modulation par étalement du spectre et des considérations relatives aux brouillages. Pour la transmission d'informations, on peut utiliser en AMES une modulation quelconque à enveloppe constante.

Un système AMES-MF, qui utilise la modulation de fréquence pour la transmission d'informations, a été mis en service, et sa qualité de fonctionnement a été étudiée à l'aide du satellite ATS-1 [Yokoyama et autres, 1974].

Dans un système à spectre étalé, il est nécessaire de synchroniser le générateur de codes du récepteur avec le signal entrant. L'acquisition initiale d'un signal AMES s'effectue habituellement avec un faible rapport porteuse/bruit par une recherche dans le temps d'un signal séquentiel PB. La synchronisation et la démodulation sont effectuées dans le mode à bande étroite et la dérive de fréquence de la liaison pose des problèmes. On a appliqué une technique utilisant un signal MDF cohérent de bas niveau pour résoudre certains de ces problèmes et effectuer l'acquisition initiale dans un bref délai.

Des travaux ultérieurs comportant l'utilisation du codage de correction d'erreur et utilisant les propriétés des codes PB pour simplifier le multiplexage des voies, ont été présentés par [Yokoyama et autres, 1979a et b].

La technique AMES a été appliquée à des satellites à limitation de puissance très rigoureuse. Il semble qu'elle ne soit pas intéressante pour les réseaux publics de radiocommunication parce qu'elle diminue fortement le nombre des accès possibles [Schwartz et Munter, 1973]. Cependant, le système AMES présente l'intérêt pour les applications de faible capacité. Par exemple, en raison de ses caractéristiques propres de dispersion d'énergie et d'insensibilité aux brouillages, son utilisation pourrait faciliter la coordination des systèmes à satellite de faible capacité avec d'autres services.

4.2.5 *Accès multiple avec adresse par impulsions (AMAI)*

La technique AMAI s'utilise en téléinformatique non coordonnée [Schwartz et Munter, 1973]. On peut la considérer aussi comme un système AMRT non coordonné. L'utilisateur émet un ou plusieurs paquets de données, complets avec information d'adresse, à l'instant où il a besoin de communiquer une information, sans que son choix soit influencé par toute autre considération ni que l'utilisateur se soit préalablement assuré qu'un autre usager demande l'accès au répéteur du satellite. La capacité maximale de transmission de données par le système est déterminée par la probabilité de collision des paquets, qui ne doit pas dépasser une limite acceptable. Comme on peut s'y attendre, la capacité des répéteurs d'un tel système est assez mal utilisée. Cet inconvénient est à mettre en balance avec la simplicité du système.

On peut améliorer l'utilisation de la capacité du système AMAI en s'arrangeant pour que les paquets ne puissent être émis que périodiquement, par exemple en utilisant une structure à trames tout en maintenant le caractère désordonné de l'accès à une trame. On améliorera encore l'utilisation de la capacité des répéteurs en recourant à un système AMRT organisé (mais sans complication).

5. Influence du type de répéteur de satellite

La caractéristique entrée/sortie du répéteur de satellite influe directement sur le choix des méthodes de modulation et d'accès multiple. Certains types courants de répéteurs de satellite sont décrits ci-après.

5.1 *Répéteurs sans traitement à bord du satellite*

Fondamentalement, ces répéteurs reçoivent, amplifient, transposent en fréquence et retransmettent divers types de signaux de télécommunication.

On peut envisager d'autres structures: répéteurs à large bande et répéteurs à répartition de voies. La plupart des répéteurs de satellite qui sont actuellement utilisés dans le service fixe par satellite comportent des récepteurs à large bande suivis d'émetteurs à bande étroite à répartition de voies.

On obtient la possibilité de connecter entre eux différents canaux en utilisant des matrices de commutation ou des dispositifs répartiteurs passifs.

Les caractéristiques des répéteurs de satellite sont principalement influencées par les performances des amplificateurs avec tube à ondes progressives (TOP). D'autres aspects de ce problème sont traités ci-après.

5.1.1 *Répéteurs à limitation stricte*

Les répéteurs à limitation stricte comportent un limiteur qui écrête le signal d'arrivée. Cela permet de faire fonctionner l'amplificateur à TOP au point de saturation avec une puissance de sortie presque indépendante de la puissance d'entrée du répéteur. Toutefois, l'exploitation sur plusieurs porteuses est limitée en raison du bruit d'intermodulation (voir le § 6.3).

5.1.2 *Répéteurs quasi linéaires*

Un TOP se comporte de manière plus linéaire si on le fait travailler avec une puissance de sortie plus éloignée du point de saturation. On peut dire en gros que la réduction doit être de 4 à 6 dB pour le fonctionnement en AMRF; une réduction plus faible suffit en général pour réduire l'étalement du spectre et la distorsion dans la bande lorsqu'il s'agit d'émissions MDP à une seule porteuse.

5.1.3 *Répéteurs à plus grande linéarité*

Pour un répéteur linéaire idéal, la caractéristique de transfert serait linéaire jusqu'au point de saturation. Pour améliorer la portion linéaire de cette caractéristique au-delà de ce que l'on obtient avec des répéteurs munis d'amplificateurs à TOP, on peut procéder de deux manières différentes.

L'une consiste à améliorer la linéarité des répéteurs de satellite équipés d'amplificateurs à TOP en utilisant divers linéariseurs qui ont été mis au point: linéariseurs avec alimentation en amont [Lubell, 1974], matrices de Butler [Sandrin, 1974] ou techniques de prédistorsion (voir l'Annexe II, dans laquelle est présenté un exemple de ces dernières).

L'autre consiste à remplacer l'amplificateur à TOP par un amplificateur transistorisé appliquant la technique du transistor à effet de champ, dont la caractéristique intrinsèque de transfert est plus linéaire que celle d'un TOP lorsqu'on approche du point de saturation. Les amplificateurs transistorisés sont en cours de mise au point et offrent des perspectives intéressantes car ils devraient permettre d'améliorer la linéarité (et la fiabilité) tout en évitant les inconvénients de masse et de puissance à bord du satellite que l'on observe avec la technique précédemment mentionnée de linéarisation avec amplificateur à TOP.

5.2 *Répéteurs effectuant un traitement du signal dans le satellite*

Le fonctionnement et le rendement des systèmes numériques à satellites peuvent être améliorés grâce à l'utilisation de répéteurs effectuant un traitement du signal dans le satellite et pouvant procéder aux opérations de commutation, de régénération ou de traitement dans la bande de base.

5.2.1 *Commutation aux radiofréquences*

On peut envisager trois opérations en hyperfréquences:

a) la commutation de paquets d'information d'un canal de transmission à un autre;

b) la commutation de paquets d'information d'un faisceau étroit fixe à un autre;

c) la commutation d'un faisceau orientable d'une station terrienne à une autre.

L'opération *a)* peut être effectuée par un transposeur embarqué agile en fréquence. Ce dispositif peut réaliser l'interconnexion de stations terriennes fonctionnant sur des fréquences porteuses différentes.

L'opération *b)* permet d'interconnecter des stations terriennes ayant accès à différents faisceaux étroits, par interconnexion cyclique des signaux AMRT au moyen d'une matrice à commutation temporelle, installée à bord du satellite. La matrice de commutation à hyperfréquences est commandée par une unité de distribution programmable, synchronisée par une référence de temps stable. Chaque station terrienne du réseau synchronise l'émission de ses paquets d'information sur la séquence de commutation programmée du satellite, pour pouvoir communiquer avec les stations terriennes ayant accès à d'autres faisceaux. On a étudié et proposé plusieurs structures de ce type [Schmidt et Cooperman, 1973; Muratani, 1974].

L'opération *c)* nécessite la mise en œuvre d'un faisceau orientable. Un satellite à faisceau étroit orientable à gain élevé peut fournir une couverture globale de toute la zone de service, sans perdre les avantages d'un gain d'antenne élevé et d'un AMRT efficace. Dans un tel système, les stations terriennes du réseau utilisent en partage un seul canal radioélectrique en mode AMRT, tandis que le faisceau orientable balaye la zone de service en synchronisation avec le système de répartition dans le temps.

5.2.2 *Répéteurs-régénérateurs*

Si l'information numérique transmise est reconstituée à bord par régénération [Castellani et autres, 1977], la liaison montante sera séparée de la liaison descendante, ce qui présentera les principaux avantages suivants:

- le taux d'erreur total du système de télécommunication est la somme des taux d'erreur des liaisons montantes et descendantes, au lieu d'être déterminé par le rapport total porteuse/bruit. Cela permet de réduire la p.i.r.e. de la station terrienne et celle du satellite;
- les effets des distorsions de non-linéarité des deux liaisons ne s'ajoutent pas;
- il y a élimination, dans le satellite, des brouillages par trajets multiples qui pourraient résulter d'un couplage radioélectrique entre différentes voies;
- les modulateurs du satellite permettent d'alimenter l'amplificateur RF par des signaux qui sont pratiquement exempts de composantes de modulation d'amplitude. Par conséquent, ces amplificateurs peuvent fonctionner au niveau de saturation sans dégradation notable de leur qualité de fonctionnement;
- dans les systèmes AMRT-CS, on peut réaliser des matrices de commutation de bord en utilisant des circuits de bande de base. Ces matrices offrent des avantages appréciables (du point de vue masse, encombrement, consommation d'énergie) par rapport aux matrices de commutation en hyperfréquences qui doivent être employées avec des répéteurs non régénérateurs; la matrice de commutation aux fréquences de la bande de base consistera en des portes logiques simples. Des composants classiques pourraient permettre la fabrication de matrices très rapides et de grande capacité, consommant peu d'énergie et ayant de petites dimensions;
- on peut concevoir des systèmes de redondance plus faciles à réaliser à bord des satellites;
- on peut placer à bord une horloge maîtresse du système, afin de simplifier le rétablissement du rythme et la synchronisation de trame dans les systèmes AMRT-CS;
- on peut faire en sorte que la liaison descendante fonctionne sur le mode d'une porteuse continue (même en AMRT) grâce à l'utilisation d'une remodulation à bord du satellite.

5.2.3 *Traitement des trains de bits*

L'information numérique étant disponible à bord du satellite, on peut recourir à un certain nombre de techniques perfectionnées. La conversion de débit binaire est une des caractéristiques les plus intéressantes du traitement des signaux dans les satellites [Pattini, 1980]. Dans les systèmes AMRT-CS desservant un grand nombre de stations terriennes dont les besoins de trafic sont très différents, les stations à faible trafic ont généralement une efficacité limitée; elles sont en effet conçues pour avoir un débit de transmission élevé mais n'exploitent leurs ressources que pendant un faible pourcentage du temps. En de pareils cas, il y a de grands avantages à équiper le satellite de répéteurs-régénérateurs fonctionnant à des débits binaires différents. Chaque station desservie fonctionnera au débit binaire répondant le mieux à ses propres besoins de trafic.

L'interconnexion entre stations fonctionnant à des débits binaires différents sera obtenue grâce à des convertisseurs de débit binaire et à des matrices de commutation embarqués.

On peut envisager d'autres méthodes de traitement numérique dans le satellite: décodage de correction d'erreurs et application du principe de l'enregistrement-retransmission avec mémoires-tampons appropriées. La fiabilité sera le principal problème posé par ces applications.

Enfin, on pourra adopter sur la liaison descendante un plan de modulation différent de celui de la liaison montante.

6. Exemples d'analyse de la transmission

6.1 *MRF-MF*

La relation fondamentale entre le rapport porteuse/bruit et le rapport signal/bruit dans un système à modulation de fréquence classique peut s'exprimer comme suit:

$$S/N = (C/N) \times \frac{3(F_{ch})^2}{f_2^3 - f_1^3} \times B_{RF} \times p \times W \qquad (1)$$

ou

$$S/N = (C/N) \times \frac{(F_{ch})^2}{(f_m)^2 + \frac{b^2}{12}} \times (B_{RF}/b) \times p \times W \qquad (2)$$

Quand la valeur de f_m est environ quatre fois plus grande que celle de b, la relation précédente peut être remplacée, avec une erreur négligeable, par l'approximation suivante:

$$S/N = (C/N) \times (F_{ch}/f_m)^2 \times (B_{RF}/b) \times p \times W \quad (3)$$

où

S/N: rapport de la puissance du signal d'essai (soit 1 mW en un point de niveau relatif zéro) à la puissance du bruit (valeur psophométrique) dans la voie téléphonique la plus élevée;

C/N: rapport porteuse/bruit dans la bande B_{RF};

B_{RF}: largeur de bande radioélectrique (Hz);

f_2: fréquence limite supérieure de la bande passante de la voie la plus élevée dans la bande de base (Hz);

f_1: fréquence limite inférieure de la bande passante de la voie la plus élevée dans la bande de base (Hz);

$f_m = (f_2 + f_1)/2$: fréquence milieu (moyenne arithmétique) de la voie la plus élevée dans la bande de base (Hz);

$b = (f_2 - f_1)$: largeur de la voie téléphonique (Hz);

F_{ch}: valeur efficace de l'excursion du signal d'essai par voie (Hz);

p: facteur d'amélioration dû à la préaccentuation;

W: facteur de pondération psophométrique.

La largeur de bande b a une valeur typique de 3100 Hz et, dans le présent Rapport, on a supposé que $p = 2{,}5$ (4 dB) et $W = 1{,}8$ (2,5 dB).

Dans la formule ci-dessus, seuls B_{RF} et F_{ch} sont des inconnues. Pour obtenir F_{ch} et par conséquent B_{RF}, il faut trouver une autre relation entre ces deux grandeurs. On admet que la largeur de bande B_{RF} est donnée par la formule:

$$B_{RF} = 2\,(\Delta F + f_m) \quad (4)$$

(soit la largeur de bande selon la règle de Carson) où ΔF représente l'excursion de crête multivoie.

Afin de réduire à une valeur admissible le bruit d'intermodulation dû à la limitation de la largeur de la bande (bruit de «troncature»), il importe d'établir une relation entre ΔF et F_{ch}. Une formule couramment utilisée pour les bandes de base MRF est:

$$\Delta F = F_{ch} \times g \times L \quad (5)$$

dans laquelle

ΔF: excursion de crête (Hz),

g: facteur «valeur de crête/valeur efficace» (rapport numérique). Ainsi, pour une valeur du rapport «valeur de crête/valeur efficace» de:

13 dB, $g = 10^{13/20} = 4{,}47$;

10 dB, $g = 10^{10/20} = 3{,}16$.

$$\left.\begin{aligned} L &= 10^{\frac{-15 + 10 \log n}{20}} \quad \text{pour } n \geqslant 240 \text{ voies} \\ &= 10^{\frac{-1 + 4 \log n}{20}} \quad \text{pour } n < 240 \text{ voies} \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Les premiers systèmes fonctionnaient avec un rapport «valeur de crête/valeur efficace» de 13 dB, mais dans les systèmes plus récents on utilise 10 dB et les résultats sont satisfaisants. En règle générale, on peut s'attendre que la valeur de 13 dB convienne mieux pour les capacités inférieures à 120 voies environ, alors que celle de 10 dB est préférable pour les capacités plus élevées.

Dans les systèmes à modulation de fréquence, il existe des seuils de fonctionnement caractéristiques et, à l'origine, on admettait une marge de fonctionnement (m) de 6 dB au-dessus du seuil dans la liaison satellite-Terre. On considère que, pour les démodulateurs MF classiques, le seuil se produit pour un rapport porteuse/bruit de 10 dB. Le seuil correspondant à la largeur de bande radioélectrique B_{RF} peut être abaissé par des techniques telles que la démodulation avec contre-réaction de fréquence ou asservissement de phase; il peut alors se trouver inférieur d'environ 4 dB à ce qu'il est avec un démodulateur normal.

L'emploi de démodulateurs à abaissement de seuil dans les systèmes à modulation de fréquence ne modifie pas la relation de base entre les rapports signal/bruit et porteuse/bruit. Il permet tout simplement de travailler avec des rapports porteuse/bruit de plus faible valeur.

La Fig. 9 représente la relation entre les rapports signal/bruit et porteuse/bruit dans un système MF. Au-dessus du «coude» des courbes, le rapport signal/bruit est directement proportionnel au rapport porteuse/bruit. Suivant le pourcentage de temps considéré, il faut respecter trois critères différents, qui sont indiqués par des lignes horizontales. Quand on étudie un système MF, la difficulté est de choisir convenablement le rapport porteuse/bruit par temps clair de façon que le rapport signal/bruit se trouve au-dessus de ces trois horizontales, en fonction des pourcentages de temps spécifiés dans l'Avis 353.

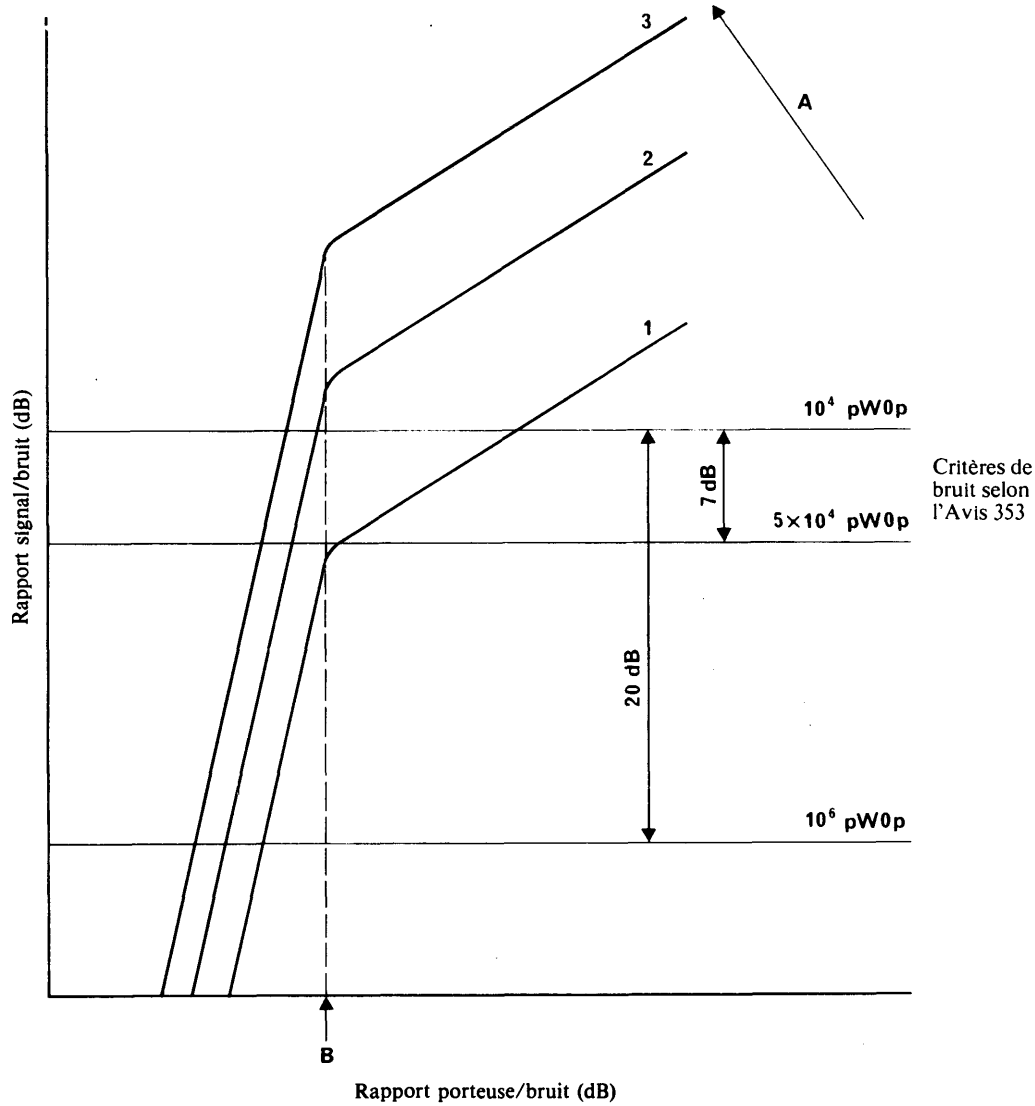


FIGURE 9 – *Relation entre les rapports signal/bruit et porteuse bruit dans un système MF*

Courbes A: Excursion croissante (c.à.d. largeur de bande)
B: Point de rupture

Aux fréquences où les évanouissements du signal émis par le satellite sont négligeables, le procédé est simple. Dans ce cas, le rapport porteuse/bruit reste constant, et l'on peut facilement choisir une excursion telle que le rapport signal/bruit soit au-dessus de l'horizontale correspondant à 10 000 pW0p. Les courbes de la Fig. 9 représentent alors trois cas possibles:

Courbe 1: système à largeur de bande limitée;
Courbe 2: système à puissance et à largeur de bande limitées;
Courbe 3: système à puissance limitée.

Quand le système fonctionne à des fréquences où les évanouissements sont importants (par exemple, à 11/14 GHz), le compromis optimal entre la puissance et la largeur de bande se complique. Il faut alors recourir à un procédé itératif avec excursion variable. On choisit une largeur de bande qui correspond à une certaine excursion. On calcule alors le rapport signal/bruit pour différents pourcentages de temps, et l'on vérifie que les critères correspondants sont satisfaits. Selon que tous les rapports signal/bruit sont au-dessus des critères correspondants ou que l'un quelconque d'entre eux est au-dessous, on réduit ou on augmente, respectivement, l'excursion. A cela s'ajoute une limitation: la largeur de bande ne doit pas dépasser son maximum admissible.

Une notion très intéressante dans les systèmes à «limitation par la largeur de bande» est celle du minimum de «bande de garde» requis entre les porteuses d'un récepteur. Les systèmes de conception actuelle doivent tenir la largeur de bande selon la règle de Carson, pour chaque porteuse jusqu'au milieu des 90% de la largeur de bande unitaire qui leur est attribuée; il faut, pour cela, prévoir un filtre limiteur de bande dans chaque station terrienne à l'émission. Dans ces conditions, on maintient le brouillage par la porteuse adjacente dans des limites tolérables. Or, le filtre en question peut perturber de son côté la porteuse qui le traverse en lui imposant un bruit impulsif, conséquence de l'effet de «troncature» qu'il produit. Cela étant, la détermination de la largeur de bande de la porteuse ainsi que la détermination de l'espacement des porteuses doivent se faire sur la base d'études de compromis rigoureuses; compromis entre le bruit dû au brouillage par la porteuse adjacente, y compris le bruit impulsif, et le bruit introduit par les filtres passe-bande. On a constaté également que l'emploi de démodulateurs à abaissement de seuil, dans la station terrienne (réception), donne de meilleurs résultats que les démodulateurs classiques disponibles, pour ce qui est de la réduction des brouillages par la porteuse adjacente.

6.1.1 *MRF-MF avec compression-extension*

L'analyse qui précède peut aussi s'appliquer à la modulation MRF-MF avec circuits à compression-extension, sous réserve des modifications suivantes:

- l'amélioration subjective du bruit qui résulte de l'application de la compression-extension permet d'utiliser une valeur réduite en conséquence pour le rapport signal d'essai/bruit (S/N) dans les formules (1) à (3). La valeur de cette amélioration doit être établie expérimentalement. Des valeurs de l'ordre de 16 dB ont été mesurées [Skevington, 1979]. Il est parfois possible d'admettre, pour les projets, une amélioration quelque peu inférieure afin de ne pas dégrader la qualité de transmission des données à des rapidités plus élevées;
- il se peut que la valeur retenue pour la caractéristique «g», facteur «valeur de crête/valeur efficace» soit plus basse que pour une liaison sans compression-extension du fait que l'on peut admettre que le bruit dû à la distorsion de phase dans le filtre de prédétection et aux effets de troncature augmente en même temps que le bruit thermique. Cependant, il n'est pas encore possible de présenter de recommandation spécifique;
- le facteur de charge L doit être modifié comme suit:

$$L_c = \begin{cases} 10^{\frac{1}{20}(-11{,}2+10\log n_c)} & \text{lorsque } n_c > 240 \\ 10^{\frac{1}{20}(2{,}8+4\log n_c)} & \text{lorsque } n_c < 240 \end{cases} \qquad (7)$$

Si un dispositif de compression-extension est ajouté à une liaison existante en sorte que B_{RF} ainsi que le rapport porteuse/bruit demeurent inchangés, le rapport de la capacité en voies de la liaison avec compression-extension à celle de la liaison sans compression-extension varie d'une valeur quelque peu inférieure à 2 pour des porteuses de grande capacité à 2,5 environ pour des porteuse de faible capacité (voir l'Annexe IV).

6.1.2 *MRF-MF avec concentration des conversations*

On trouvera dans l'Annexe IV une analyse des liaisons MRF-MF mettant en œuvre des techniques de concentration des conversations. La concentration des conversations peut aussi être utilisée en même temps que la compression-extension. Dans ce cas, l'analyse combine les procédures utilisées pour chaque méthode.

Si l'on applique la concentration des conversations à une liaison en service de telle sorte que B_{RF}, le rapport porteuse/bruit (C/N) et le rapport signal/bruit (S/N) demeurent inchangés, le rapport de la capacité en voies de la liaison avec concentration des conversations à celle de la liaison originale varie de 1,6 environ pour les porteuses à grande capacité à 1,8 pour les porteuses à faible capacité.

6.1.3 *Applications pratiques de porteuses MRF-MF avec compression-extension et concentration des conversations*

Sur deux réseaux nationaux par satellite des Etats-Unis d'Amérique, on applique aujourd'hui la compression-extension en vue d'accroître la capacité de porteuses MRF-MF. Actuellement, la capacité a été presque doublée; il devrait être possible d'aller encore plus loin en réalisant les systèmes pour une valeur plus faible du rapport valeur de crête/valeur efficace. Les circuits actuellement utilisés sont d'une qualité acceptable pour la transmission de données jusqu'à des rapidités d'au moins 4800 bauds.

On trouve actuellement sur le marché des équipements permettant d'appliquer les techniques de concentration des conversations aux circuits téléphoniques MRF-MF [Elder et O'Neill, 1978]. Bien que ces équipements soient actuellement relativement coûteux, le simple fait qu'ils permettent de doubler approximativement la capacité par unité de largeur de bande de base rend l'application de cette technique intéressante dans certains cas.

6.2 *MDP (cohérente) quadrivalente*

Seule la téléphonie MIC sera considérée dans le présent paragraphe. L'Avis 522 spécifie les critères de qualité pour ces circuits. Comme pour les circuits analogiques, trois critères différents correspondent à différents pourcentages de temps. Pour obtenir les taux d'erreur sur les bits indiqués ci-dessous, il faut appliquer les rapports théoriques (énergie par bit/densité spectrale de bruit) inscrits en regard de chacun d'eux:

10^{-3} : $E_b/N_0 = 6{,}7$ dB

10^{-4} : $E_b/N_0 = 8{,}4$ dB

10^{-6} : $E_b/N_0 = 10{,}4$ dB

où

E_b : l'énergie par bit d'information,

N_0 : puissance de bruit par Hz.

Quand on calcule le rapport porteuse/température de bruit (C/T), on doit ajouter des marges aux valeurs théoriques pour tenir compte de dégradations autres que le bruit thermique. Pour autant que ces autres dégradations soient petites en comparaison du bruit thermique, on peut souvent les considérer comme ayant des distributions gaussiennes et ajouter leurs puissances à celle du bruit thermique. Cependant, il arrive souvent que ces dégradations supplémentaires ne sont pas petites, auquel cas on devra procéder à une combinaison d'analyses, de simulations sur ordinateur et de mesures [Lundquist et autres, 1974; Lundquist, 1974; Muratani et autres, 1972; CCIR, 1974-78].

Quand on détermine la valeur requise de C/T pour une valeur particulière du taux d'erreur sur les bits, on doit considérer les effets suivants de dégradation du signal:

- distorsions de filtrage;
- non-linéarité des amplificateurs de puissance équipant le satellite et la station terrienne émettrice;
- brouillage entre voies adjacentes;
- brouillage dans une même voie;
- brouillage par un système extérieur;
- transmission par trajets multiples à l'intérieur du satellite;
- réduction de puissance dans l'amplificateur, due à la modulation;
- pertes dans les filtres en aval de l'amplificateur de puissance.

A noter que le rapport E_b/N_0, tel que défini ci-après, est rapporté à l'entrée du filtre de réception. E_b est donc l'énergie par bit de la porteuse modulée. Si on utilise une porteuse non modulée pour mesurer E_b, il faudra ajouter une marge appropriée pour tenir compte des pertes dans les filtres et de la réduction de puissance à la sortie du tube à ondes progressives (TOP), sous l'effet de la modulation. Certains auteurs préfèrent inclure ces pertes et définir la valeur E_b comme étant la puissance de la porteuse non modulée à la sortie de l'amplificateur de puissance, au point de saturation.

Réduire à un minimum la dégradation totale est une opération très complexe, qui implique des compromis entre de nombreux paramètres, avec de nombreuses conditions aux limites portant sur la largeur de bande disponible, la puissance disponible, etc.

Pour un système habituel fonctionnant à 60 Mbit/s, avec espacement de 40 MHz entre voies et polarisations croisées dans le satellite, la marge à prévoir au-delà de la valeur théorique est de 4 dB environ [CCIR, 1974-78]. Dans ce système, le point de fonctionnement optimal de l'amplificateur de puissance du satellite est le point de saturation.

Un système AMRT s'exploite dans le mode paquet. On doit alors synchroniser la phase de l'onde porteuse et les bits au début de chaque paquet. Si le système de transmission a été correctement optimalisé, la conception du circuit de synchronisation influence principalement le comportement du système dans les transitoires, et l'on peut admettre l'hypothèse de caractéristiques de transmission continues pour étudier les filtres et les tubes à ondes progressives [Lundquist et autres, 1974; CCIR, 1974-78].

6.3 *Intermodulation dans un système à porteuses multiples*

Dans les systèmes à satellites à porteuses multiples, l'intermodulation est l'une des dégradations les plus graves quant à la perte de puissance. En effet, il faut prévoir, généralement, un fort recul de puissance pour abaisser le niveau de la distorsion due à l'intermodulation. On peut parfois réduire la dégradation de l'intermodulation par un choix judicieux des assignations de fréquence, tel que les produits d'intermodulation nuisibles se trouvent sur des fréquences différentes des fréquences porteuses qui transmettent l'information [Babcock, 1953]. Malheureusement, comme tout compromis optimal entre la puissance et la largeur de bande entraîne nécessairement un resserrement assez étroit des porteuses dans la bande de fréquences attribuée, cette disposition judicieuse des fréquences est rarement possible.

Pour utiliser la puissance au mieux, c'est-à-dire obtenir la plus grande capacité possible pour le satellite, il faut porter à un maximum le rapport de la puissance de chaque porteuse à la puissance de bruit totale. (On suppose pour l'instant que toutes les porteuses sont d'égale amplitude.) Comme l'intermodulation dépend beaucoup de la proximité entre le point de fonctionnement de l'amplificateur de puissance et le point de saturation, on peut diminuer l'intermodulation en réduisant la puissance de cet amplificateur par rapport à la puissance de saturation. Mais il en résulte une diminution de la puissance de sortie disponible et, si on considère la structure donnée à porteuses multiples, on arrive à un point au-delà duquel la diminution de la puissance d'intermodulation n'est pas suffisante pour justifier les pertes de puissance à la sortie.

Le point correspondant au recul de puissance optimale dépend beaucoup du nombre des porteuses et varie d'un système à un autre. Il est fonction aussi des caractéristiques propres de l'amplificateur de puissance. Dans la pratique, cette optimalisation est donc une opération assez compliquée à mener, et il est difficile de fournir, à cet égard, autre chose que des indications générales. De grands efforts ont été consacrés à des analyses théoriques et informatiques ainsi qu'à des expériences de laboratoire.

La Fig. 10 est extraite de Berretta et Gough [1976]. C'est un exemple de bruit d'intermodulation dans le cas de porteuses ayant des amplitudes et des espacements égaux, dans un répéteur équipé d'un amplificateur ordinaire avec tube à ondes progressives. Il en ressort que le bruit d'intermodulation est très fort, à moins que le tube à ondes progressives ne fonctionne nettement en dessous de son point de saturation. (Il convient de signaler que la Fig. 10 ne peut pas servir directement à optimaliser un système, puisqu'elle ne renseigne pas sur la variation de la puissance de sortie en fonction de la puissance d'entrée [Berretta et Gough, 1976].)

Les choses se compliquent encore si l'on considère le cas où les porteuses ont des amplitudes inégales et transmettent des signaux de types différents, modulés selon des méthodes différentes. Les influences de la propagation peuvent aussi varier avec l'emplacement des stations terriennes.

L'influence des produits d'intermodulation qui tombent dans un canal de transmission particulier dépend de la méthode de modulation employée et du niveau relatif de ces produits. On a étudié diverses façons de diminuer le niveau d'intermodulation. Il existe une méthode qui consiste à utiliser des dispositifs de prédistorsion permettant de linéariser les caractéristiques globales de l'amplificateur [Bremenson et Jaubert, 1974]. Les essais réalisés sur ce système font apparaître une amélioration d'environ 3 dB du recul de puissance de sortie, ou un minimum d'environ 6 dB du niveau d'intermodulation. Les détails de ces résultats sont donnés dans l'Annexe II.

Dans les systèmes SCPC avec commande par la voix, l'intermodulation a une influence réduite. La raison en est que les porteuses y sont mises en activité de façon aléatoire et que, par conséquent, la distribution instantanée des produits d'intermodulation est elle-même aléatoire. La réduction d'intermodulation ainsi obtenue est de 3 dB environ [McClure, 1970].

Dans un système à satellites où une commande par la voix permet de tirer pleinement parti des marges supplémentaires disponibles, il est difficile d'établir des circuits à fort taux d'activité comme c'est le cas des circuits de données.

Quand on analyse un système MDP, on constate que l'influence de l'intermodulation dépend beaucoup de sa distribution statistique. Si les produits d'intermodulation sont écrêtés, leur influence est similaire à celle d'un brouillage entre voies, et certains des résultats du Rapport 388 sont applicables. On observera toutefois qu'il peut exister une corrélation statistique entre les produits d'intermodulation et la porteuse utile, puisque les premiers proviennent de la seconde.

Pour conclure, il convient de préciser que l'analyse complète des effets de l'intermodulation dans un système donné nécessitera des calculs théoriques et informatiques de haut niveau, faisant intervenir tous les facteurs évoqués ci-dessus.

7. Comparaison de systèmes représentatifs

Les Fig. 11 à 13 représentent, dans des cas typiques, la variation du nombre de voies en fonction de la somme de la p.i.r.e. du satellite (en dBW) et du facteur de qualité G/T de la station terrienne en dB(K^{-1}) (T étant exprimé en K).

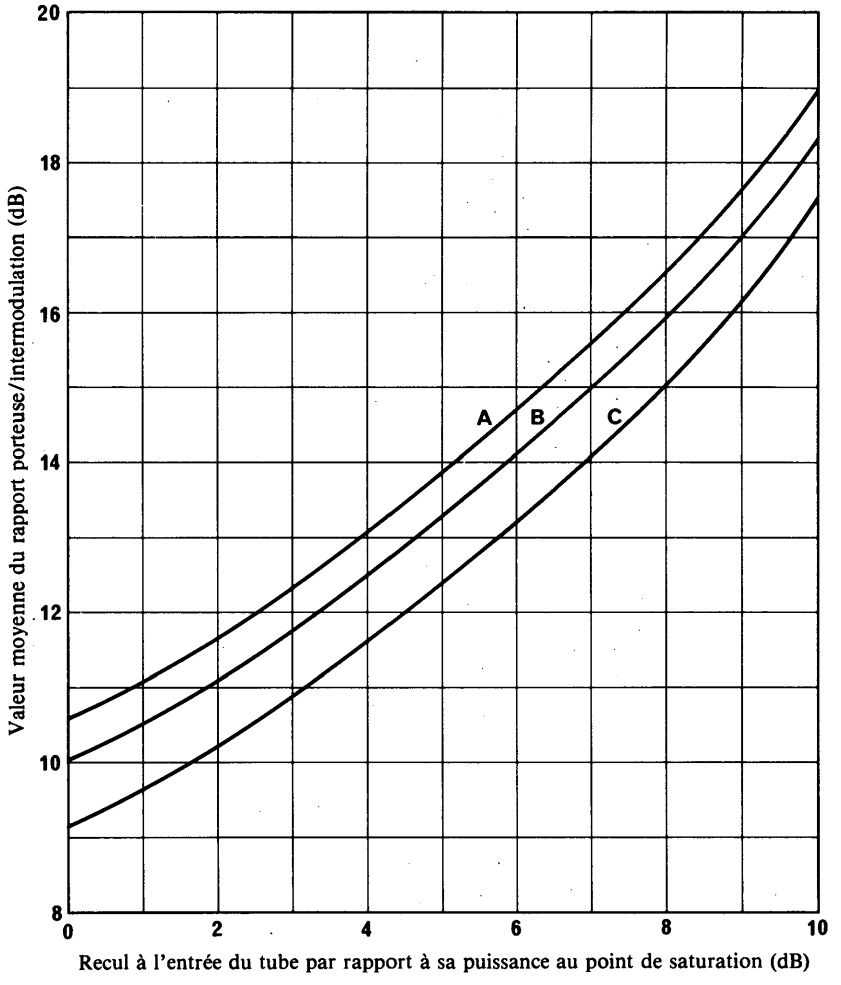


FIGURE 10 – *Variation de l'intermodulation dans un tube à ondes progressives de type courant*

Courbes A: 6 porteuses
B: 12 porteuses
C: 500 porteuses

Pour établir ces courbes, on fait les hypothèses suivantes:

MRF-MF-AMRF

- répartition du bruit:
  1000 pW0p: brouillage causé par les systèmes de Terre;
  1000 pW0p: bruit imputable au temps de propagation de groupe et à l'intermodulation, dans la station terrienne;
  3000 pW0p: bruit thermique sur la liaison montante et bruit d'intermodulation dans le répéteur commun;
  5000 pW0p: bruit thermique sur la liaison descendante;
- recul de puissance à la sortie pour les porteuses multiples: 3 dB;
- rapport crête/valeur efficace: 10 dB;
- les bandes de garde nécessaires représentent 25% de la largeur de bande occupée; en conséquence, la largeur de bande utilisable par porteuse, sur la base d'une largeur de bande de 40 MHz pour un répéteur du satellite, est donnée par:
  $B_{RF0} = 32/N$ MHz, où N représente le nombre des porteuses.

Aux fins de comparaison, on va considérer deux exemples avec MDP:

MIC-MDP-AMRF

- le taux d'erreur sur les bits est de 1×10^{-6};
- la marge au-dessus du rapport théorique E_b/N_0 est de 6 dB;
- le nombre de porteuses est de 10;
- les hypothèses relatives au recul de puissance des porteuses multiples et aux bandes de garde sont les mêmes que plus haut.

MIC-MDP-AMRT

- il peut y avoir jusqu'à 10 stations terriennes ayant accès au répéteur du satellite de 40 MHz, d'où la nécessité d'au moins 10 intervalles de temps par trame;
- chaque station terrienne peut comporter jusqu'à 600 voies téléphoniques unidirectionnelles, et ceci dans un intervalle de temps assigné de durée variable déterminée par le nombre de voies téléphoniques transmises;
- la durée de trame (intervalle de récurrence) est limitée à 125 µs (valeur de la période d'échantillonnage);
- il existe un temps de garde de 100 ns entre les intervalles de temps (intervalles élémentaires);
- on accorde 800 ns pour la synchronisation de porteuse et d'intervalle de temps, pour le préambule et pour la coordination du système.

Dans les quelques exemples de MDP considérés ici, on suppose que le système subit uniquement un bruit thermique; on introduit une marge supplémentaire de rapport signal/bruit pour tenir compte d'autres effets.

Le nombre de niveaux de phase considérés dans les exemples est de 2, 4, 8 ou 16 (voir le Rapport 793). Avec le système MIC-MDP, on admet que la largeur de bande radioélectrique (B_{RF}) nécessaire pour la transmission est égale à 1,2 fois le taux de transmission des symboles. Pour une valeur donnée du rapport porteuse/bruit, la puissance d'émission requise à la station spatiale est proportionnelle à B_{RF} et, par conséquent, au nombre de voies n.

Dans le système avec MIC-MDP par détection synchrone, c'est le rapport signal de bande de base/bruit après détection qui détermine la puissance de bruit présente dans une voie téléphonique. L'analyse montre que, indépendamment du nombre des voies, une probabilité d'erreur sur les bits de 10^{-4} correspond à une puissance de bruit d'environ 50 000 pW0p dans une voie téléphonique. Ceci est pratiquement exact aussi bien pour les systèmes MRT-MIC que MRF-MIC.

Un avantage des systèmes codés en MIC avec modulation MDP est qu'ils se prêtent à l'emploi de la CNC (voir le § 2.2). On obtient ainsi approximativement un dédoublement de la capacité. C'est ce qu'illustre la Fig. 11. Les discontinuités que l'on observe dans les courbes MDP des Fig. 11 et 13 résultent de la limitation à 40 MHz de la largeur de bande d'émission du satellite.

On peut accroître la capacité d'un système AMRF en utilisant la MAP sur une ou deux porteuses. Dans le cas d'un système à 14 porteuses, on signale des augmentations allant jusqu'à 100%.

8. Possibilités éventuelles d'amélioration de la capacité en voies de répondeurs

Le Tableau II, dressé à partir des données de Kwan [1978], offre une comparaison entre la capacité en voies téléphoniques d'un répondeur et celle de porteuses MRF-MF utilisant les diverses techniques de traitement des conversations et de modulation décrites dans les précédentes sections du présent Rapport. Les valeurs indiquées correspondent à une exploitation AMRF avec une valeur de p.i.r.e. du satellite plus un facteur de qualité de station terrienne suffisant, dans chaque cas, pour permettre l'occupation de la totalité de la largeur de bande du répondeur. Bien que ces valeurs puissent varier selon les circonstances, il est évident qu'il existe des possibilités d'améliorer sensiblement la capacité des répondeurs. On trouvera de plus amples renseignements à ce sujet dans Welti et Kwan [1977].

Il ne faut pas oublier que les méthodes de modulation qui permettent d'obtenir la plus grande capacité des répondeurs peuvent aussi exiger des rapports C/N plus élevés. Cela risque d'avoir des répercussions importantes, à savoir un coût plus élevé des équipements et une plus grande vulnérabilité au brouillage.

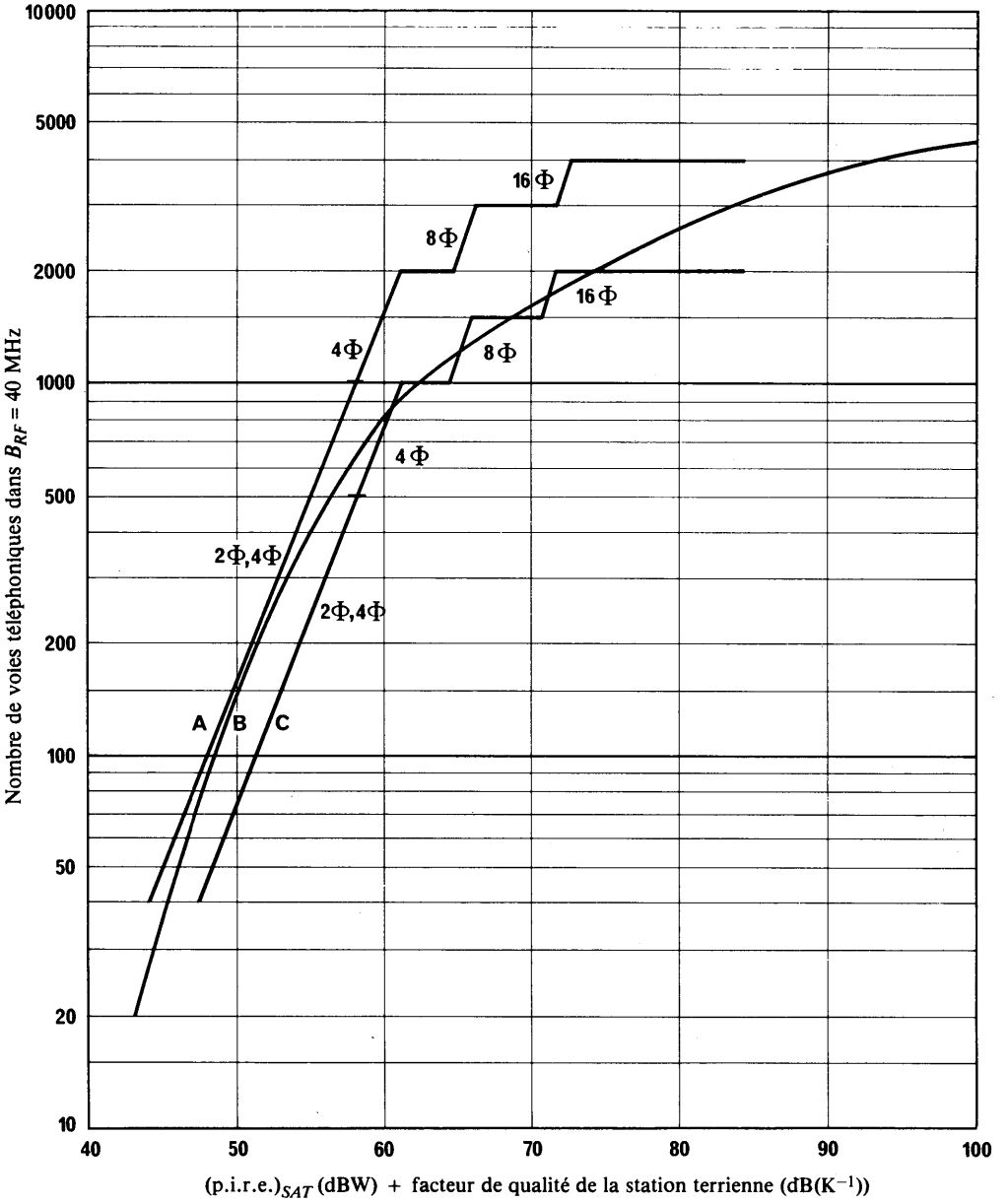


FIGURE 11 – *Accès simple*

Courbes A: MRT-MIC-CNC-MDP (cohérente)
B: MRF-MF
C: MRT-MIC-MDP (cohérente)

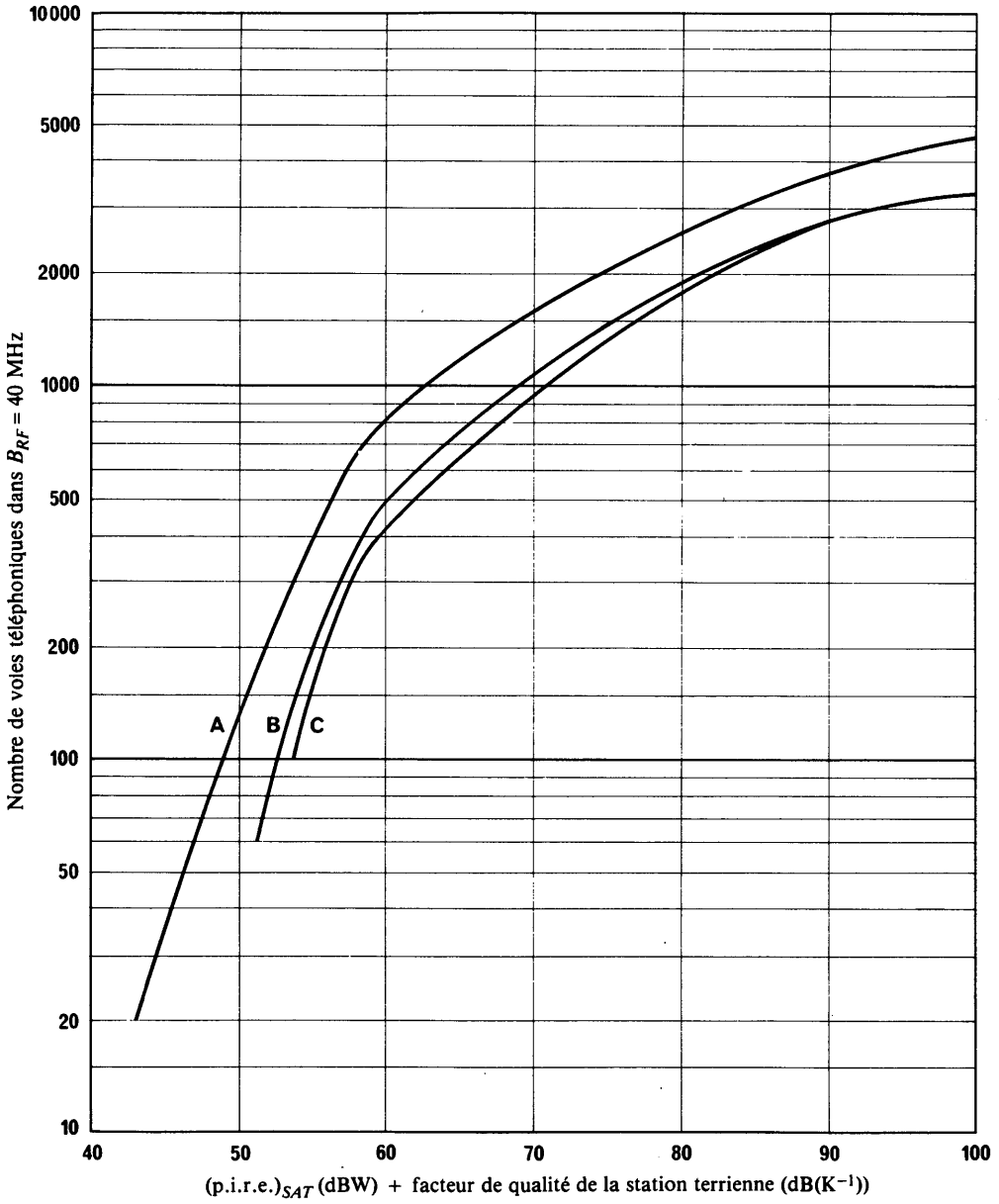


FIGURE 12 – *Caractéristiques de capacité en AMRF*

Courbes A: MRF-MF, 1 porteuse
B: MRF-MF-AMRF, 5 porteuses
C: MRF-MF-AMRF, 10 porteuses

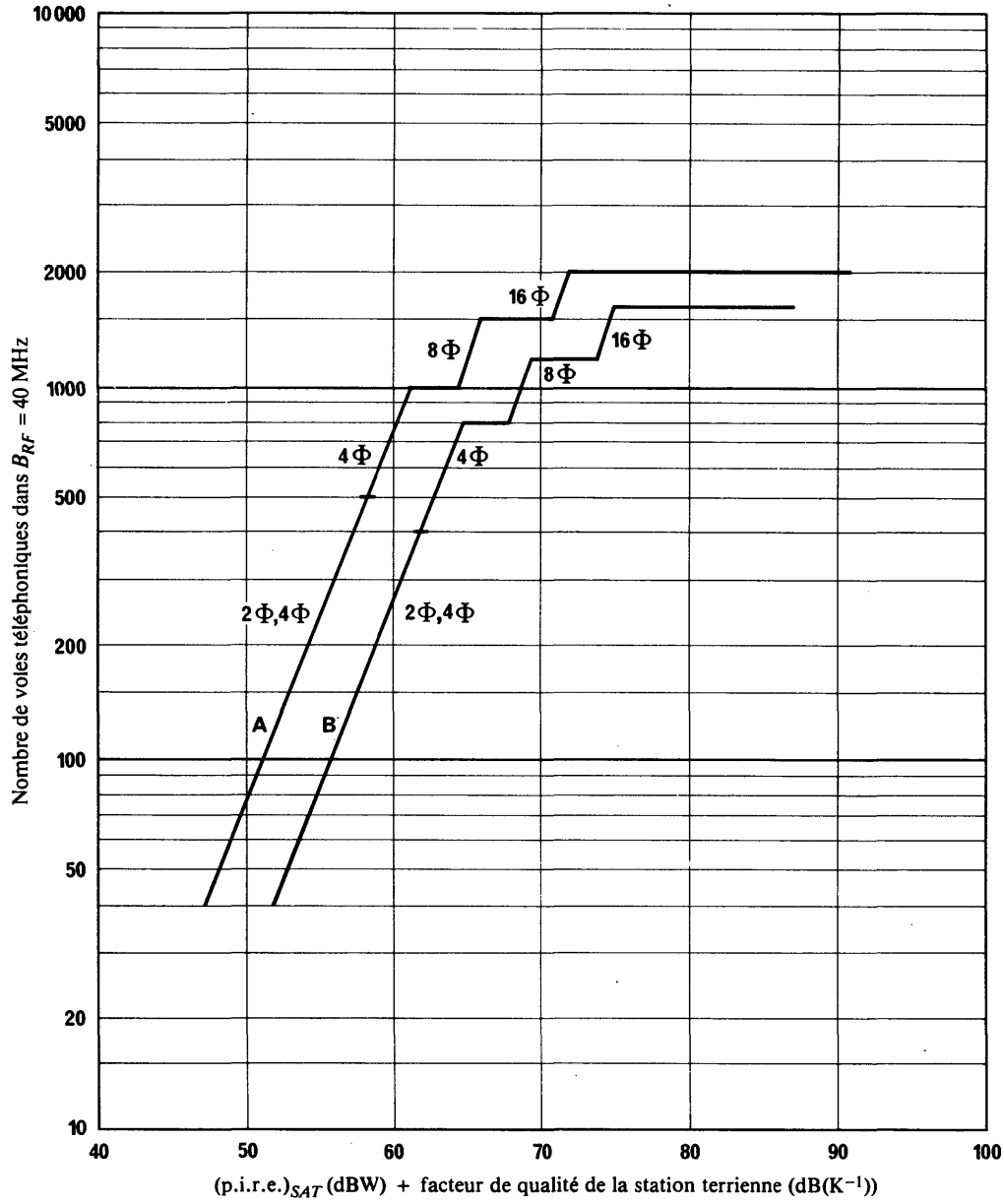


FIGURE 13 – *Accès multiple, exemples*

Courbes A: MRT-MIC-MDP (cohérente)-AMRT
B: MRT-MIC-MDP (cohérente)-AMRF

TABLEAU II – *Capacités relatives en voies téléphoniques d'un répondeur pour diverses méthodes de traitement des conversations et de modulation*

Traitement des signaux et modulation pour la liaison par satellite	Traitement dans la bande de base de Terre			
	MRF	MRF-TASI	MRT	MRT-DSI
MF	1,0	1,6	–	–
MF avec compression-extension	2,0	3,1	–	–
MAP-bivalente	2,9	5,75	2,9	5,75
MIC-MDP quadrivalente	1,25	2,2	1,4	2,75
MIC-MAQ-4D	1,8	3,6	2,1	4,2
MIC-NIC-MDP quadrivalente	–	–	2,5	5,0
MD-MDP quadrivalent MIC-DA-MDP quadrivalente	–	–	3,0	6,0
MD-MAQ-4D MICDA-MAQ-4D	–	–	4,5	9,0

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BABCOCK, W. C. [janvier 1953] Intermodulation interference in radio systems. *BSTJ*, Vol. XXXII, **1**, 63-73.

BERRETTA, G. et GOUGH, R. [1976] Improvements in the characterisation of high power amplifiers in multi-carrier operation. *ESA Sci. Tech. Rev.*, Vol. 2, **2**, 103-113.

BREMENSON, C. et JAUBERT, P. [juin 1974] Réseau linéariseur pour tube à onde progressive. *Rev. Tech. Thomson-CSF*, Vol. 6, **2**, 529-548.

BULLINGTON, K. et FRASER, J. M. [mars 1959] Engineering aspects of TASI. *BSTJ*, Vol. XXXVIII, **2**, 353-364.

CASTELLANI, V., PENT, M., PATTINI, F. et PORZIO GIUSTO, P. [décembre 1977] Design guidelines for a satellite regenerative repeater. Proc. Symposium on Advanced Satellite Communication Systems, Gênes, Italie, 155-164.

CHAKRABORTY, D., SUGIYAMA, M. et MURATANI, T. [mars 1977] Field tests of a 120-channel hybrid modem via satellite. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 7, **1**, 299-309.

COPPERI, M., MODENA, G., NEBBIA, L. et SCAGLIOLA, C. [11-13 novembre 1975] DPCM system with adaptive quantization for speech communications. Proc. 3rd International Conference on Digital Satellite Communications, Kyoto, Japon, Paper E.7, 196-200.

DAVIS, R. C. et FANG, R. J. F. [novembre 1975] Channel capacity extension via FDMA/PSK/DSI. Proc. 3rd International Conference on Digital Satellite Communications, Kyoto, Japon, 170-179.

DUTTWEILER, D. L. et MESSERSCHMITT, D. G. [août 1976] Nearly instantaneous companding for nonuniformly quantized PCM. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-24, **8**, 864-873.

ELDER, J. M. et O'NEILL, J. F. [1978] A speech interpolation system for private networks. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '78), Conf. Record 14.6.1-14.6.5.

EVANS, B. G. et KERNOT, R. J. [juillet 1975] Satellite communication system employing single-channel/carrier frequency modulation with syllabic companding. *Proc. IEE*, Vol. 122, **7**, 703-709.

GORDON, J., BARRETT, R. et MONTAGUE, N. [juin 1974] Feasibility study of error-code multiplexing systems. ESA Final Report, Contrat 1914/73SW, CR(P)-541. European Space Agency, Neuilly-sur-Seine, France.

HELLER, J. A. et JACOBS, I. M. [octobre 1971] Viterbi decoding for satellite and space communication. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-19, **5**, 835-848.

HUSTED, J. et DINWIDDY, S. [octobre 1978] Low cost satellite data transmission networks using demand assigned TDMA. INTELSAT/Teleglobe Canada. 4th International Conference on Digital Satellite Communications, Montréal, Canada, IEEE Cat. N° 78CH1326-8.

JANKOWSKI, J. A. Jr. [printemps 1976] A new digital voice-activated switch. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 6, **1**, 159-178.

JAYANT, N. S. [juin 1974] Digital coding of speech waveforms: PCM, DPCM and DM quantizers. IEEE International Conference on Communications (ICC '74), Minneapolis, Minn., Etats-Unis d'Amérique. Vol. 62, **5**, Doc. 29B, 611-632.

KWAN, R. K. [1978] Modulation and multiple-access selection for satellite communications. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '78), Birmingham, Al., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Rec. 48.1.1-48.1.4.

LIPKE, D. W. et SWEARINGEN, D. W. [17-19 juin 1974] Communications system planning for MARISAT. IEEE International Conference on Communications (ICC '74), Minneapolis, Minn., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Session 29: Maritime satellite progress, 29B-1-29B-5.

LUBELL, P. D. [avril 1974] Linearizing amplifiers for multi-signal use. *Microwaves.*

LUNDQUIST, L. [17-19 juin 1974] Optimizing a TDMA channel including synchronization. IEEE International Conference on Communications (ICC '74), Minneapolis, Minn., Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Session 43: Synchronization in digital satellite communications, 43A-1-43A-4.

LUNDQUIST, L., LOPRIORE, M. et GARDNER, F. [septembre 1974] Transmission of 40 phase-shift keyed time-division multiple access over satellite channels. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-22, **9**, 1354-1360.

LYGHOUNIS, E. et COSTA, G. M. [juin 1971] Speech interpolation in the economy of TDMA systems. Symposium on Long-Term Prospects for Satellite Communication (1 Int. Comunicazioni) Gênes, Italie.

McCLURE, R. B. [8-10 juin 1970] Analysis of intermodulation distortion in an FDMA satellite communication system with a bandwidth constraint. IEEE International Conference on Communications (ICC '70), San Francisco, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 8: Bandwidth limited communications, 8-29-8-36.

MURATANI, T. [novembre 1974] Satellite-switched time-domain multiple access. IEEE Electronics and Aerospace Systems Convention (EASCON '74), Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, Doc. N° 908, 189-196.

MURATANI, T., TSUJI, Y. et HARA, T. [mai 1972] Transmission characteristics of PSK wave in non-linear system – application to INTELSAT-IV satellite system. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, Vol. 55-B, **5**, 256-262.

NIWA, K., OKADA, T., ITOH, Y. et AIKOH, S. [1979] Block companding PCM terminal for 44 channel transmission over T1 line. IEEE Electronics and Aerospace Systems Convention (EASCON '79), Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique, 419-424.

NUSPL, P. P. [novembre 1972] Proposed experiments in regional TDMA with demand assignment. Conf. Record, 2nd International Conference on Digital Satellite Communications, Paris, France.

PANKOV, G. Kh., GREBELSKY, M. D., SIMONOV, M. M., TSIRLINE, V. M. et ROZENBAUM, M. I. [1979] Apparatoura MDVU dlya peredatchi tsifrovoi informatsii tcherez ICZ (Equipement AMRT pour la transmission d'information numérique par satellite). *Elektrosviaz*, **11**, 29-31.

PATTINI, F. [juin 1980] Efficiency of an SS-TDMA system with on-board bit-rate conversion. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, Wa., Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 12: Advanced communication system architecture, 12-2.1-12-2.5.

PUENTE, J. G., SCHMIDT, W. G. et WERTH, A. M. [février 1971] Multiple-access techniques for commercial satellites. *Proc. IEEE*, Vol. 59, **2**, 218-229.

QUAGLIONE, G., RUSPANTINI, L. et LEMBO, D. [septembre-octobre 1972] Capacità di un sistema di accesso multiplo a divisione di tempo per satelliti di telecomunicazioni (Maximalisation de la capacité des systèmes à satellites fonctionnant avec accès multiple par répartition du temps). *Elettronica e Telecomunicazioni*, Vol. XXI, **5**, 169-176.

RICHARDS, D. L. [1973] *Telecommunication by Speech*, Butterworth & Co. Ltd, Londres, Royaume-Uni.

SANDRIN, W. A. [automne 1974] The Butler matrix transponder. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 2, **2**, 319-345.

SCHMIDT, W. G. et COOPERMAN, R. [11-13 juin 1973] A satellite-switched SDMA/TDMA system for a wideband multibeam satellite. IEEE International Conference on Communications (ICC '73), Seattle, Wa., Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 12: Multibeam Satellite Systems, 12-7-12-12.

SCHWARTZ, J. W. et MUNTER, M. [1973] Multiple-access communications for computer nets. *Computer Communication Networks*, 269. Edité par Abramson and Kuo.

SEARLE, B. C. et NUSPL, P. [octobre 1980] Slim TDMA pilot project. IEEE Communication and Power Conference (CANCOP '80), Montréal, Canada, 339-341.

SKEVINGTON, R. C. [27-29 novembre 1979] Compandors for FDM/FM voice traffic. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 12: Satellite distribution systems, 12.5.1-12.5.5.

TAKADA, M. et DOI, H. [août 1969] PCM time division satellite multiple-access communication system (SMAX). *Rev. Elec. Comm. Lab. NTT*, Vol. 17, **8**, 725-746.

THOMAS, C. M., MAY, C. L. et WELTI, G. R. [juin 1975] Hybrid amplitude-and-phase modulation for analogue data transmission. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, **6**, 634-645.

WATANABE, Y. et IZUMI, K. [11-13 novembre 1975] A new TDMA system for domestic service and its high speed modem. Proc. 3rd International Conference on Digital Satellite Communications, Kyoto, Japon.

WELTI, G. R. [automne 1973] Application of hybrid modulation to FDMA telephony via satellite. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 3, **2**, 419-430.

WELTI, G. R. [1976] PCM/FDMA satellite telephony with 4-dimensionally-coded quadrature amplitude modulation. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 6, **2**, 323-338.

WELTI, G. R. et KWAN, R. K. [5-7 décembre 1977] Comparison of signal processing techniques for satellite telephony. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '77), Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 5: Tomorrow's need-today's challenge, 05-1.1-05-1.6.

WERTH, A. M. [1969] SPADE: a PCM/FDMA demand assignment system for satellite communication. Proc. 1st International Conference on Digital Satellite Communications, IEE Conf. Publ. N° 59.

WHITE, D. E. [11-13 novembre 1975] A new synchronisation scheme for satellite TDMA systems. Proc. 3rd International Conference on Digital Satellite Communications, Kyoto, Japon.

YOKOYAMA, M., KOSAKA, K., URATSUKA, M., HARADA, K., TSUKAMOTO, K. et IMAI, F. [1974] SSRA communication experiment via ATS-1. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 21, **104**, 93-160.

YOKOYAMA, M., SASAOKA, H., HAMAMOTO, N., SASAKI, K. et KANEKO, T. [27 novembre 1979a] New synchronization method for the SSRA system. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 15: New techniques in spread spectrum communications, 15.3.1-15.3.5.

YOKOYAMA, M., SASAOKA, H., YOSHIMOTO, S., SASAKI, K. et SHIOJIMA, M. [27 novembre 1979b] Development of the multiplexed-SSRA equipment and experimental results. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record, Vol. 1, Session 15: New techniques in spread spectrum communications, 15.5.1-15.5.5.

Documents du CCIR

[1974-78]: 4/79 (Agence spatiale européenne).

ANNEXE I

MÉTHODES DE CONCENTRATION NUMÉRIQUES DES CONVERSATIONS

1. Fonctions du système et modes de transmission

Les fonctions de base nécessaires à l'exploitation d'un système de concentration numérique des conversations (CNC) peuvent être groupées en deux grandes catégories correspondant aux deux systèmes utilisables mis au point jusqu'ici.

Dans le premier système, dont les caractéristiques ont été spécifiées par INTELSAT, du côté de l'émission l'activité de chaque circuit d'entrée est contrôlée périodiquement et seuls les circuits d'entrée actifs sont connectés aux voies de transmission disponibles. A l'extrémité réception, les signaux arrivant par les voies de transmission sont dirigés sur les circuits de sortie appropriés conformément au message d'assignation CNC reçu, qui renseigne sur l'état des connexions établies du côté de l'émission.

Dans le second type de système CNC, appelé système de communications par codage prévisionnel de la parole (SPEC), après détection de la voix au terminal d'émission, l'échantillon de voix est transmis seulement lorsque la différence de niveau entre l'échantillon réel et le précédent dépasse une amplitude donnée. L'échantillon transmis est enregistré dans une mémoire du terminal de réception. D'après les renseignements contenus dans le message de signalisation d'assignation, cet échantillon enregistré est utilisé pour la reconstruction des échantillons non transmis suivants [Sciulli et Campanella, 1973].

Il existe deux façons d'incorporer la technique de concentration numérique des conversations (CNC) dans un système numérique:

- on peut appliquer cette technique à chaque faisceau de circuits ayant la même destination. Ce procédé s'appelle CNC «point à point»;
- on peut aussi appliquer cette technique à plusieurs faisceaux de circuits ayant des destinations différentes. Ce procédé s'appelle CNC «à destinations multiples».

2. Gain et qualité des conversations dus au procédé CNC

Dans les systèmes CNC, le gain théorique de capacité est limité par l'inverse de la valeur moyenne du facteur d'activité des circuits d'entrée. Toutefois, le procédé CNC est susceptible d'introduire des dégradations, systématiques ou sporadiques, de la voix.

Les dégradations systématiques sont imputables au processus de détection des signaux vocaux et au message de signalisation interne; elles peuvent être réduites ou éliminées tout au moins partiellement par des moyens appropriés [Poretti et autres, 1972; Quaglione et autres, 1972].

Les dégradations sporadiques sont liées au comportement statistique du trafic, lequel provoque une surcharge du système lorsque le nombre des circuits d'entrée en activité dépasse le nombre de voies de transmission disponibles. En pareil cas, les dégradations introduites sont liées directement au gain procuré par le procédé CNC et, par conséquent, à la capacité d'écoulement du trafic dans le système.

Lorsque le système est surchargé, il se produit un écrêtage dont la valeur moyenne est appelée «gel» (Φ). Des essais pratiques, qui ont consisté à recueillir les réactions des usagers à la dégradation entraînée par le procédé CNC, ont montré que cette dégradation n'est pas perçue par un auditeur moyen aussi longtemps que le degré de «gel» reste inférieur à 0,5%. Théoriquement, le gain procuré par le procédé CNC (G) et le degré de «gel» (Φ) sont liés au facteur d'activité moyen de la voix (A), au nombre de circuits (N_t) et au nombre de voies de transmission (N_c) [Guinand et Penicaud, 1973].

La Fig. 14 donne (G) en fonction de (N_c), pour $A = 35\%$ et $\Phi \leqslant 0{,}5\%$ et $\leqslant 1{,}0\%$. Cette courbe montre que l'avantage résultant de l'emploi de la CNC augmente avec le nombre de voies de transmission.

Un mode de concentration par diminution du nombre de bits peut être appliqué pour réduire encore plus le degré de «gel». Dans ce cas, on utilise le huitième bit des différentes voies normales pour obtenir des voies de transmission supplémentaires lorsque toutes les voies normales à huit bits sont surchargées.

La dégradation qui se produit alors consiste en une diminution du rapport signal/bruit dans les voies considérées, cette dégradation étant limitée au temps de surcharge, et éventuellement en un «gel» résiduel, qualitativement similaire à celui qui se produit lorsque l'on n'applique pas le mode de concentration par diminution du nombre de bits.

Des essais subjectifs effectués en Italie avec des matériels fonctionnant avec ou sans dispositifs pour la concentration par diminution du nombre de bits, dans des conditions d'exploitation identiques, c'est-à-dire avec des caractéristiques N_t, A et G respectivement de mêmes valeurs, ont mis en évidence que la qualité de la voix obtenue grâce à la concentration par diminution du nombre de bits est meilleure que lorsque ce procédé n'est pas appliqué [Poretti et autres, 1972]. Par exemple, dans le cas d'un système utilisant la concentration par diminution du nombre de bits, on peut s'attendre que le degré de «gel» soit inférieur à 0,05%, alors qu'il est de 0,5% pour un système dans lequel ce procédé n'est pas appliqué, les valeurs du gain procuré par la CNC étant les mêmes dans les deux cas. En outre, pour une même qualité de voix, toutes choses égales d'ailleurs, le mode de concentration par diminution du nombre de bits conduit à une valeur plus élevée du gain CNC et, par conséquent, à une plus grande capacité de transmission du système que le mode CNC normal [Poretti et autres, 1974]. La Fig. 15 est un exemple de comparaison des capacités en voies que l'on obtient en utilisant respectivement une multitrame AMRT et le procédé CNC pour les deux modes d'application, dans l'hypothèse de la même qualité de service subjective.

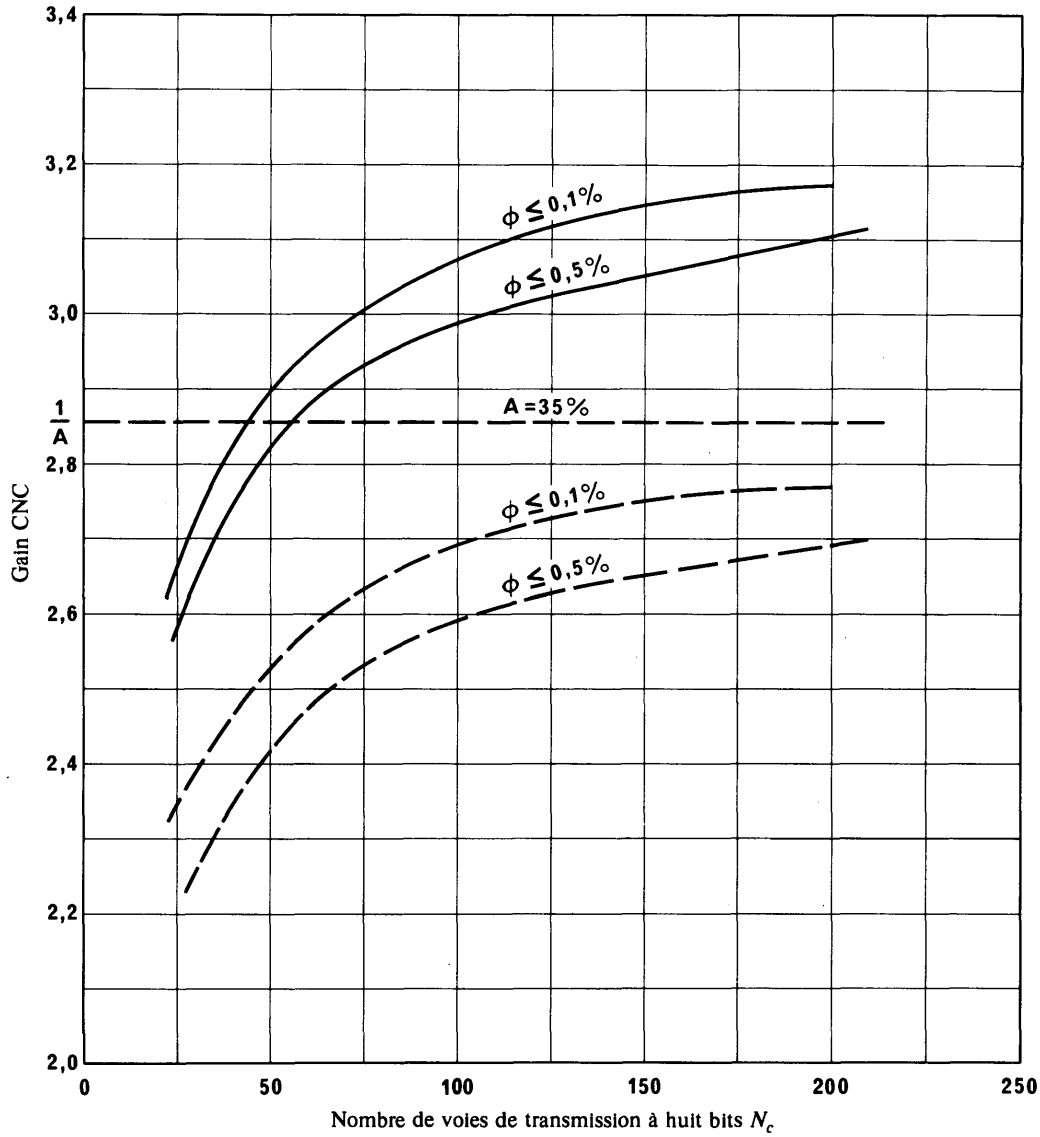


FIGURE 14 – *Gain procuré par la CNC en fonction du nombre de voies de transmission (N_c)*

——— concentration par diminution du nombre de bits

– – – – CNC normale

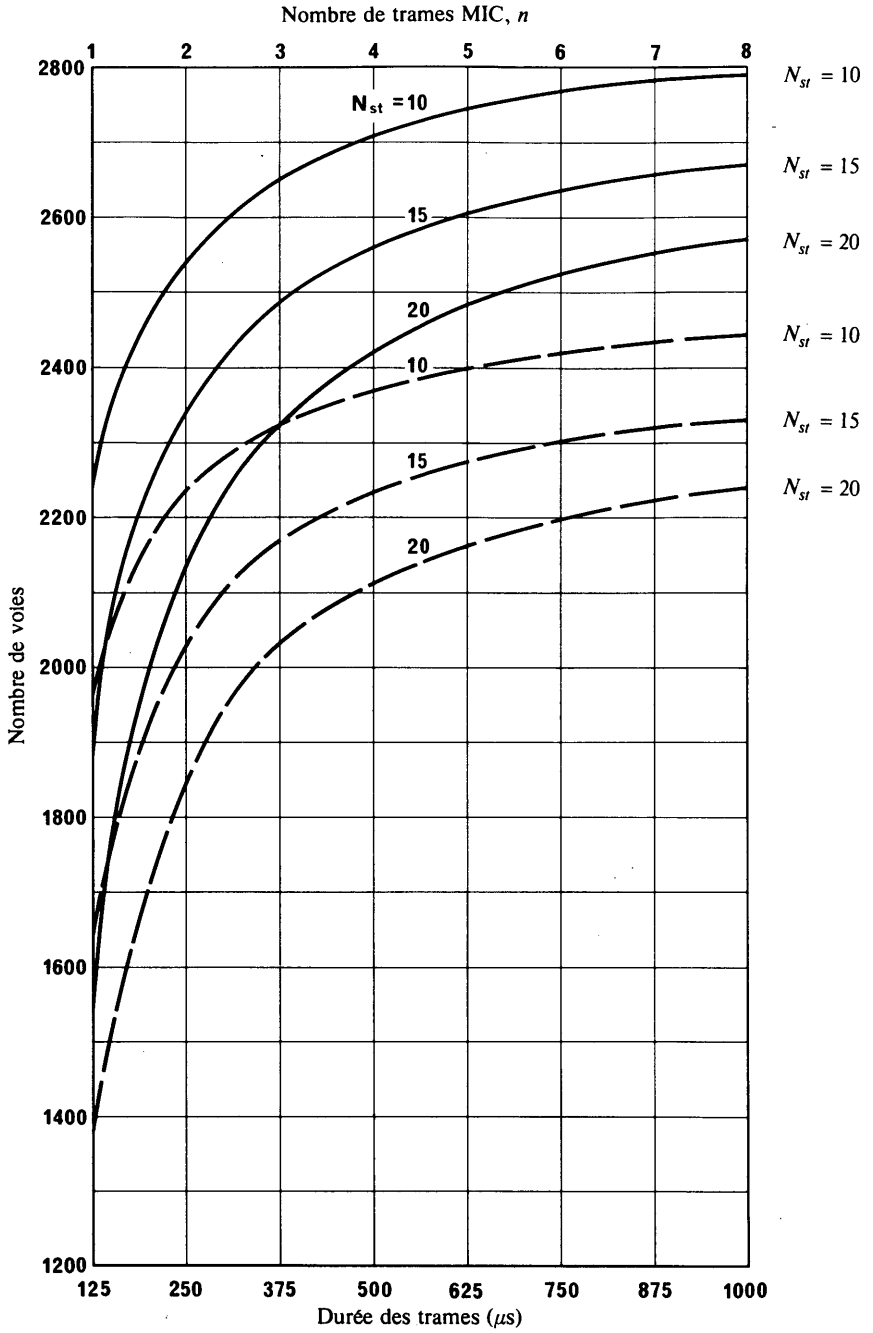


FIGURE 15 — *Capacité nette en voies d'un répéteur de satellite fonctionnant sur 36 MHz pour un système AMRT équipé d'un dispositif CNC, selon la technique CNC adoptée, et en supposant que A = 35 %*

– – – – technique de «gel» avec concentration: $\Phi \leqslant 1\,\%$

——— technique de réduction du débit binaire: $\Phi \leqslant 1\,\%$

N_{st}: nombre de stations du système

3. Transmission des données au moyen du système CNC

Les effets du système CNC sur les signaux de données en état de surcharge dépendent du système adopté pour la concentration des conversations. Si l'on a choisi une méthode avec réduction du débit binaire, les signaux de données sont toujours transmis, même sur une voie ayant un moindre pouvoir de séparation. Des essais effectués pour la transmission de données à 1200 bit/s dans la bande des audiofréquences ont confirmé que l'augmentation du bruit de quantification due à une réduction du débit binaire limitée aux périodes de surcharge ne dégrade pratiquement pas la qualité de la transmission des signaux de données, même lorsqu'il y a surcharge extrême. Si la technique de réduction du débit binaire n'est pas employée en pratique, comme c'est le cas de systèmes tels que le SPEC, les signaux de données accusent une dégradation marquée pendant les périodes de surcharge. Des essais en laboratoire [Poretti et autres, 1972] ont mis en évidence la différence de comportement des deux systèmes quant à la transmission des données et aux résultats obtenus. Les circuits de données à grande vitesse, soit jusqu'à 64 kbit/s, sont utilisés exclusivement sur des voies spécialisées. C'est pourquoi ils ne se prêtent pas à la technique de concentration de la conversation mais fonctionnent avec huit intervalles de temps de bits assignés en permanence.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GUINAND, E. et PENICAUD, J. [mars 1973] Qualité des conversations transmises sur des circuits téléphoniques concentrés par interpolation de la parole. *L'Onde électrique*, Vol. 53, **3**, 86-95.

QUAGLIONE, G., RUSPANTINI, L. et LEMBO, D. [septembre-octobre 1972] Capacità di un sistema di accesso multiplo a divisione di tempo per satelliti di telecomunicazioni (Maximalisation de la capacité des systèmes à satellites fonctionnant avec accès multiple par répartition du temps). *Elettronica e Telecomunicazioni*, Vol. XXI, **5** 169-176.

PORETTI, I., BAGNOLI, A., BERNASCONI, G. et MONTI, G. C. [juillet 1974] Use of digital speech interpolation equipment to increase the transmission capacity in telecommunication systems. *Alta Frequenza*, **7**.

PORETTI, I., MONTI, G. C. et BAGNOLI, A. [novembre 1972] Speech interpolation systems and their application in TDM-TDMA systems. Conf. Record, 2nd International Conference on Digital Satellite Communications, Paris, France.

SCIULLI, J. A. et CAMPANELLA, S. J. [juillet 1973] A speech predictive encoding communication system for multichannel telephony. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-21, **7**, 827-835.

ANNEXE II

LINÉARISATION DES TUBES A ONDES PROGRESSIVES (TOP)

Pour améliorer le rendement et la capacité des systèmes de télécommunications par satellite qui utilisent soit la méthode d'accès multiple à répartition en fréquence (AMRF) soit la méthode d'accès multiple à répartition dans le temps (AMRT), on a étudié un certain nombre de méthodes visant à améliorer la linéarisation des TOP. La Fig. 16 indique les degrés d'amélioration obtenus dans le cas de produits d'intermodulation du troisième et du cinquième ordre, lorsqu'on utilise une méthode à prédistorsion. Dans le système AMRF, l'utilisation d'un dispositif de linéarisation se traduit par une amélioration moyenne de 3 dB sur le recul de puissance de sortie ou, selon la structure des porteuses et pour une puissance de sortie donnée, une amélioration d'environ 10 dB des niveaux d'intermodulation [Bremenson et Jaubert, 1974].

Dans les réseaux AMRF, cette amélioration permettra aux TOP de la station terrienne et du satellite de fonctionner plus près du niveau de saturation et d'améliorer, de façon appréciable, la capacité globale du système.

En outre, dans les systèmes fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz et compte tenu de la puissance des tubes d'émission disponibles et des paramètres envisagés pour ces systèmes, il est vraisemblable que le TOP de la station terrienne travaillera à faible recul et même parfois à saturation (dans le cas de précipitations sur le trajet Terre-satellite).

Dans le cas du système AMRT, l'emploi d'un linéariseur permet d'améliorer le taux d'erreur de la transmission numérique en réduisant les dégradations apportées par la non-linéarité du TOP de la station terrienne et du TOP du satellite [Lombard et Bremenson, 1975].

Le linéariseur compense les effets conversions AM-AM et AM-PM dans le TOP et réduit ainsi le niveau de l'émission hors bande due à l'étalement de spectre MDP qui résulte de ces non-linéarités des TOP. C'est particulièrement important s'agissant d'une station terrienne dépourvue de filtre pour limiter l'émission hors bande [Le Ligné, 1981; Satoh et Mizuno, 1981]. Les Fig. 17 et 18 donnent, respectivement pour un TOP 2 kW à 14 GHz et pour un TOP 3 kW à 6 GHz, les valeurs des niveaux d'émission hors bande mesurées pour différents reculs de sortie, sans et avec linéariseur. Ces courbes montrent clairement qu'une réduction importante du recul de sortie ou du niveau d'émission hors bande est obtenue. Il résulte de l'emploi de linéariseur de TOP une utilisation meilleure et plus efficace de la puissance disponible des TOP de station terrienne et de satellite.

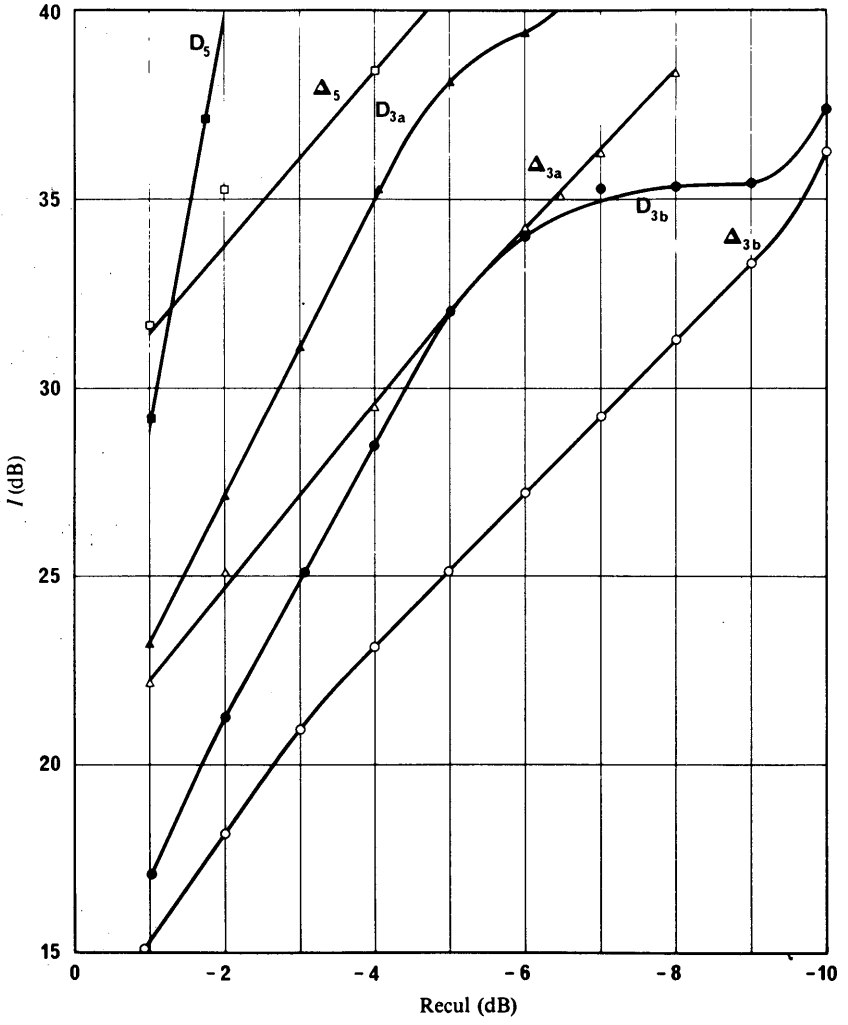


FIGURE 16 – *Intermodulation à quatre porteuses à 6000 MHz (écart total 10 MHz) avec un tube à ondes progressives de 250 W:*

D: avec correcteur: Δ: sans correcteur

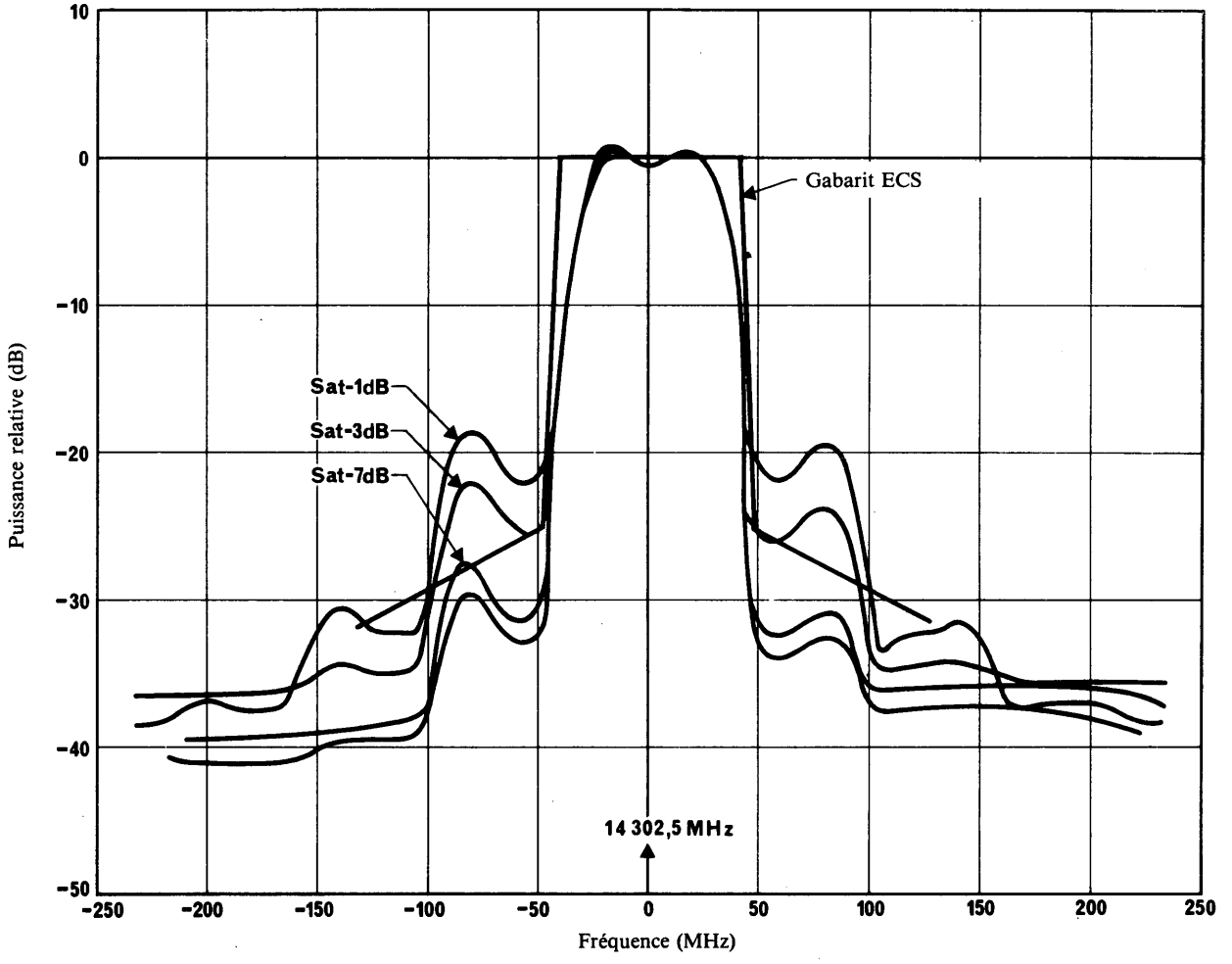


FIGURE 17a – *Emetteur sans linéariseur: variation du spectre d'une porteuse 120 Mbit/s en fonction du recul de sortie (Sat = niveau de saturation)*

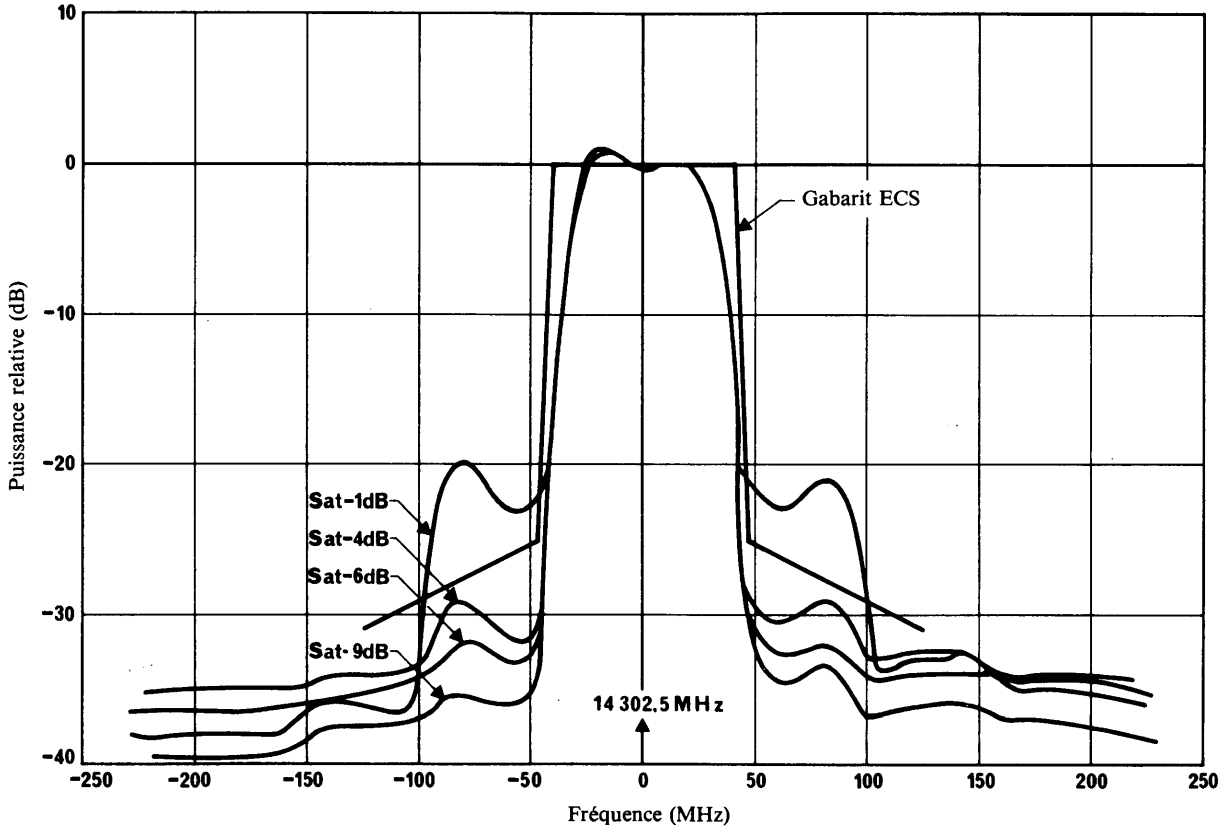


FIGURE 17b – *Emetteur avec linéariseur: variation du spectre d'une porteuse 120 Mbit/s en fonction du recul de sortie (Sat = niveau de saturation)*

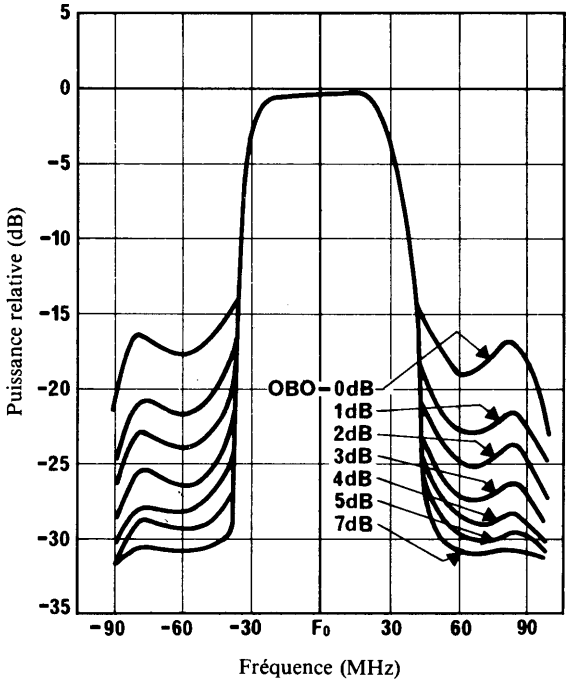


FIGURE 18a – *Spectre de puissance en sortie d'un TOP (sans linéariseur)*

OBO = recul de sortie
F_0: 6 130 MHz

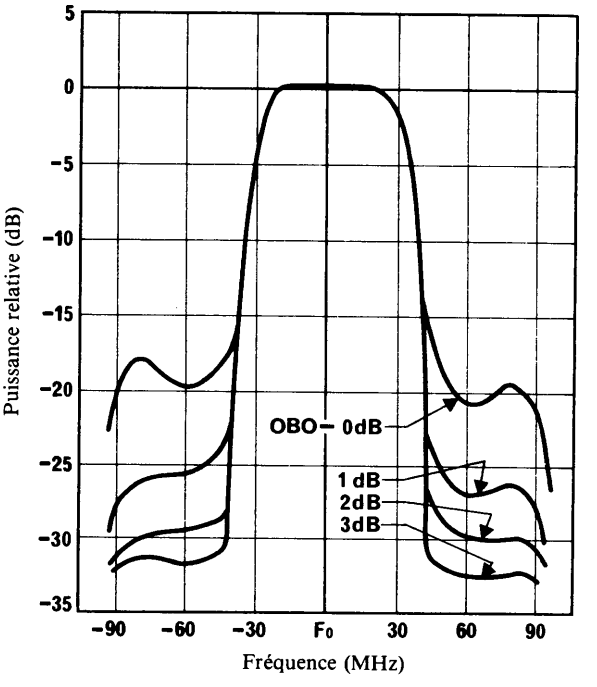


FIGURE 18b – *Spectre de puissance en sortie d'un TOP (avec linéariseur)*

OBO = recul de sortie
F_0: 6 130 MHz

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BREMENSON, C. et JAUBERT, P. [juin 1974] Réseau linéariseur pour tube à onde progressive. *Rev. Tech. THOMSON-CSF*, Vol. 6, **2**, 529-548.

LE LIGNE, J. [avril 1981] Earth station measurement techniques and lessons in earth-station design. International Conference on Results and Test of Experiments on European OTS Satellite. IEE, Londres, Royaume-Uni.

LOMBARD, D. et BREMENSON, C. [1975] Linéarisation d'un canal de transmission par satellite pour un système AMRT. 3rd International Conference on Digital Satellite Communication, Kyoto, Japon.

SATOH, G. et MIZUNO, T. [mars 1981] Non-linear satellite channel design for QPSK-TDMA transmission. 5th International Conference on Digital Satellite Communication, Gênes, Italie.

ANNEXE III

COMPARAISON ENTRE LES MÉTHODES DE MODULATION BINAIRE POUR LES LIAISONS NUMÉRIQUES PAR SATELLITE

L'objet de cette étude est de comparer quatre modulations numériques binaires du point de vue de la sensibilité aux distorsions du canal de transmission.

Pour déterminer l'ensemble modulation-filtrage qui donne les meilleurs résultats dans le cas des modulations binaires, on s'est servi d'un programme de simulation sur ordinateur d'une chaîne à trois canaux conforme au modèle présenté sur la Fig. 19.

1. Méthodes de modulation binaire considérées

La modulation binaire la plus connue est la modulation par déplacement de phase bivalente (MDP-2), qui suppose que l'enveloppe instantanée de l'onde porteuse passe rapidement par zéro entre deux états de phase. Le spectre engendré a de grands lobes latéraux. Les tentatives visant à supprimer ces lobes latéraux en filtrant la sortie du modulateur sont vaines si le trajet de transmission contient un élément non linéaire tel qu'un amplificateur à TOP fonctionnant près du point de saturation. La non-linéarité entraîne une reconstitution des lobes latéraux originaux.

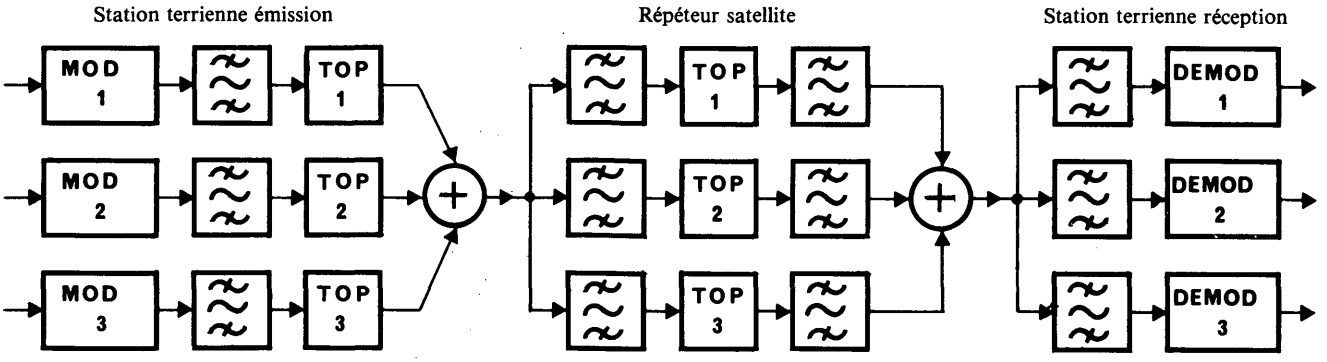


FIGURE 19 – *Transmission multicanaux par satellite*

Trois méthodes de modulation permettent de réduire cet effet: ce sont les modulations à déplacement de phase (MDP-2-4 et MDP-2-8) et la modulation à déphasage minimal (MDM).

Le Tableau III décrit ces méthodes de modulation pour un débit binaire de $1/T$ bit/s. La Fig. 21 représente les densités spectrales des signaux non filtrés.

On peut considérer les modulations MDP-2-4 et MDP-2-8 comme des approximations grossières de la MDM. Aussi des approximations plus précises pourraient être envisagées comme la MDP-2-16 ou MDP-2-32. Toutefois les études décrites plus loin ont montré que les performances de la MDP-2-8 étaient suffisamment proches de celles de la MDM pour qu'il ne soit pas intéressant de considérer des méthodes de modulation intermédiaires.

TABLEAU III – *Définition des modulations*

Modulation	Symboles émis		Nature des déplacements de phase
	1	0	
MDP-2	π	0	Un déplacement de phase instantané toutes les T secondes
MDP-2-4	$+\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	idem
MDP-2-8	$+\frac{\pi}{4}$ et $+\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$ et $-\frac{\pi}{4}$	Un déplacement de phase instantané toutes les $T/2$ secondes
MDM	$+\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	Un déplacement de phase continu de durée T toutes les T secondes

2. Comparaison des méthodes de modulation

2.1 *Modem*

La complexité du modem est un bon critère de comparaison de plusieurs méthodes de modulation de performances équivalentes. Pour les 4 méthodes considérées ici, si les modulateurs sont très différents, leurs complexités sont équivalentes. Si l'on utilise la démodulation différentielle, on peut en dire autant des démodulateurs (Fig. 20). On peut aussi démontrer [Bic et Duponteil, 1980] qu'il en est de même pour la démodulation cohérente. On peut donc en conclure que la complexité du modem est la même pour les 4 méthodes de modulation.

2.2 *Elargissement du spectre*

Si l'élargissement du spectre ne peut pas servir de seul critère de comparaison entre les différentes méthodes de modulation, il constitue une base à l'estimation des valeurs relatives des différentes dégradations causées par des non-linéarités sur la liaison. Ce phénomène a été simulé à l'aide d'un programme d'ordinateur dont la validité a au préalable été vérifiée par des comparaisons avec des mesures faites avec des signaux MDP.

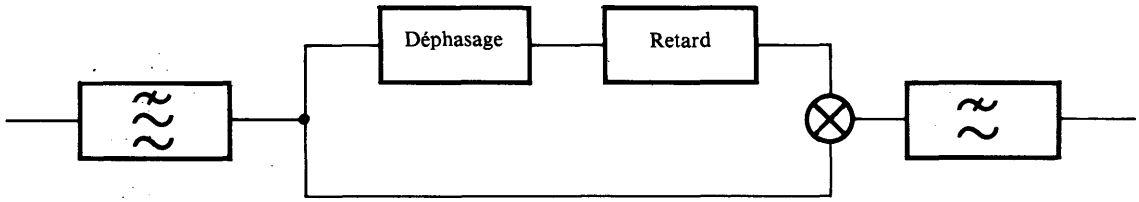


FIGURE 20 – *Démodulateur différentiel*

MDP-2: Retard: T secondes Déphasage: 0

MDP-2-4, MDP-2-8, MDM: Retard: T secondes Déphasage: $-\frac{\pi}{2}$

La Fig. 22 présente les courbes de densité spectrale après passage à travers un TOP à saturation. Un filtrage en FI simple du type Butterworth a été utilisé pour la circonstance. Des calculs avec une précompensation du type $x/\sin x$ n'ont pas donné de meilleurs résultats.

La méthode de modulation qui a conduit à l'élargissement le plus important était la MDP-2, suivie de la MDP-2-4, de la MDP-2-8 et enfin de la MDM.

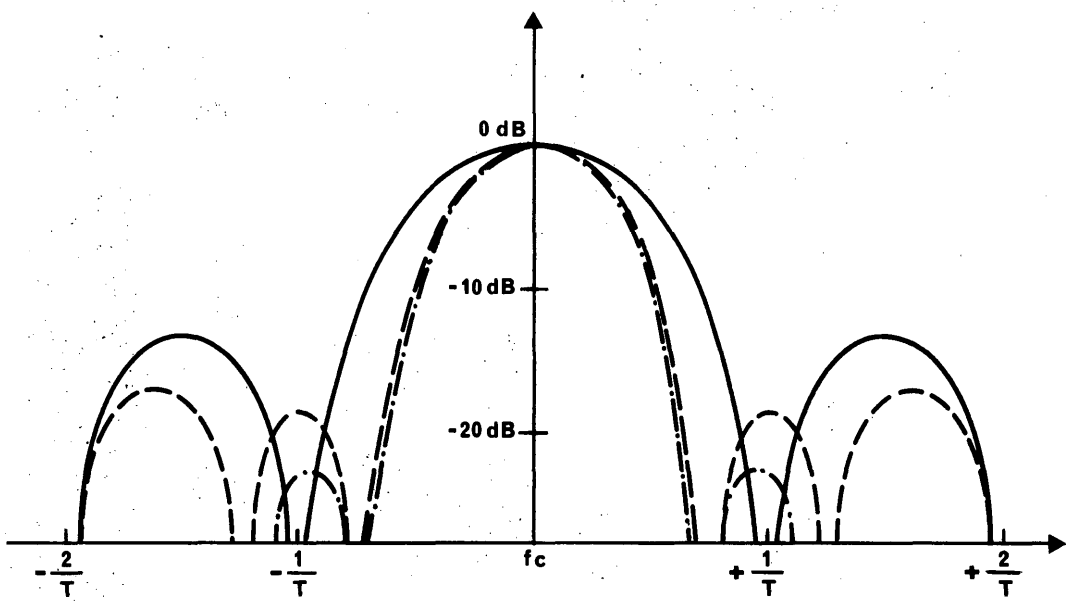


FIGURE 21 – *Densité spectrale de puissance des signaux non filtrés*

MDP-2, MDP-2-4

MDP-2-8

MDM

2.3 *Simulation de liaisons dans un satellite à plusieurs canaux*

En fin de compte, un critère satisfaisant de comparaison est le rapport E/N_0 (énergie par bit sur densité spectrale du bruit) nécessaire pour obtenir le taux d'erreur sur les bits (TEB) désiré. Les simulations ont été effectuées de manière à déterminer le rapport E/N_0 nécessaire pour un TEB de 10^{-4} et pour un espacement entre voies de $1{,}7/T$. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau IV.

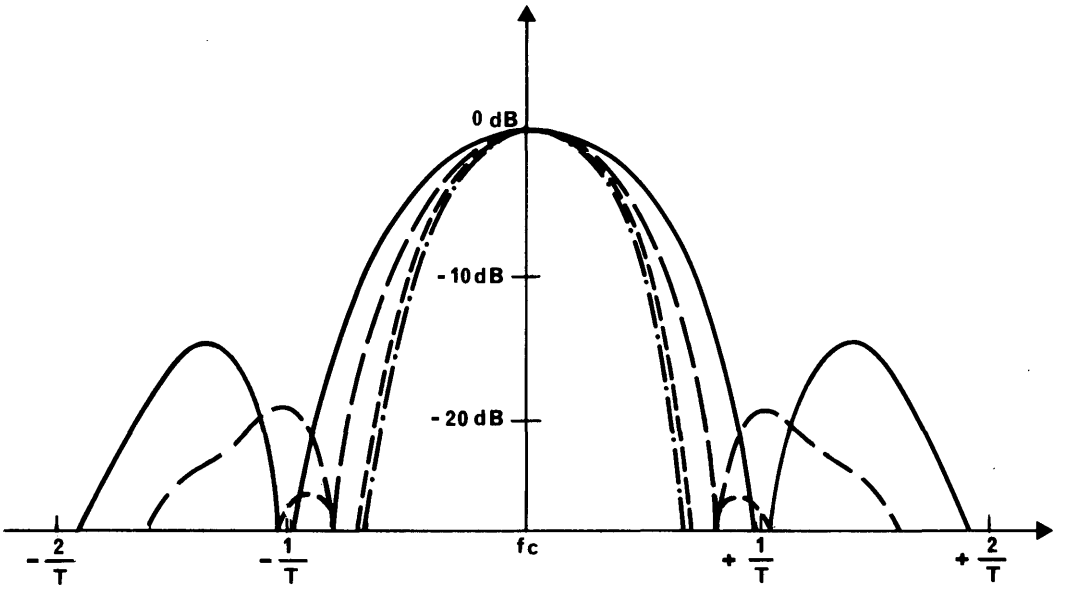


FIGURE 22 – *Densité spectrale de puissance des signaux après un passage dans un TOP saturé*

MDP-2
MDP-2-4
MDP-2-8
MDM

On a pu tirer de ces simulations les conclusions générales suivantes:

- la modulation qui conduit au meilleur résultat avec la démodulation différentielle est la MDP-2-4;
- la modulation qui conduit au meilleur résultat avec la démodulation cohérente est la MDP-2-8 ou la MDM;
- le filtrage FI le mieux adapté est celui où la courbe de réponse est plate dans la bande. La précompensation du type sin x/x n'entraîne aucune réduction du rapport E/N_0 requis pour le meilleur type de modulation;
- l'influence de la précompensation varie beaucoup en fonction du type de modulation. A titre d'exemple, pour obtenir un taux d'erreur de 10^{-4} en démodulation différentielle, la précompensation dégrade les performances du démodulateur de 1 dB en MDP-2, n'apporte aucune amélioration ni dégradation en MDP-2-4 et améliore les performances de 1 dB en MDP-2-8 et MDM;
- les effets des brouillages dans les voies adjacentes prédominent en MDP-2, tandis que ce sont les effets de la distorsion dans la bande qui prédominent en MDP-2-8 et MDM. Les résultats montrent que les modulations MDP-2-8 et MDM conviennent mieux à des voies peu espacées, alors que la MDP-2 convient mieux à des voies très espacées.

TABLEAU IV – *Rapports E/N_0 nécessaires pour un taux d'erreur sur les bits de 10^{-4}*

	MDP-2	MDP-2-4	MDP-2-8 et MDM
Démodulation différentielle (dB)	12,5	12	15
Démodulation cohérente (dB)	13,2	11,4	10,6

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIC, J. C. et DUPONTEIL, D. [1980] 4-bits OQASK; a new 16-ary APK system. Proc. IEEE International Seminar on Digital Communications, Zurich, Suisse, A4.1-A4.6.

ANNEXE IV

ANALYSE DE LA TRANSMISSION POUR DES PORTEUSES MRF-MF AVEC COMPRESSION-EXTENSION ET CONCENTRATION DES CONVERSATIONS

1. Modification du facteur de charge, L, en fonction de la compression-extension

On admet que la parole peut être représentée par une tonalité interrompue présentant une activité fractionnelle a et un niveau de puissance moyenne à long terme S_{AV} (dBm0). Dans ces conditions, la sortie moyenne du compresseur est donnée par la formule:

$$S_{AVC} = \frac{U + (S_{AV} - 10 \log a)}{2} + 10 \log a$$

$$= \frac{U + 10 \log a + S_{AV}}{2} \quad \text{dBm0} \tag{8}$$

Pour une population donnée d'interlocuteurs qui parlent, S_{AV} est une grandeur aléatoire à distribution log-normale ayant une valeur moyenne S_{AV} et une variance σ. La puissance moyenne à long terme de la parole de cette population est $P_{AV} = S_{AV} + 0{,}115\ \sigma^2$. A la suite de la compression, la distribution des niveaux des interlocuteurs qui parlent est à nouveau log-normale, la variance étant réduite de moitié, en sorte que l'on a:

$$P_{AVC} = S_{AVC} + 0{,}115\ \sigma_c^2 = S_{AVC} + 0{,}02875\ \sigma^2 \tag{9}$$

La puissance moyenne produite par n compresseurs commandés par une population donnée d'interlocuteurs qui parlent est alors donnée par la formule:

$$P_{AVCn} = \frac{U + 10 \log a + S_{AV}}{2} + 0{,}02875\ \sigma^2 + 10 \log n$$

$$= \frac{U + 10 \log a + P_{AV}}{2} - 0{,}02875\ \sigma^2 + 10 \log n \tag{10}$$

Le facteur L avec compression-extension est, dans ces conditions, donné par:

$$L_c = 10^{\frac{1}{20}\left(\frac{U + 10 \log a + P_{AV}}{2} - 0{,}02875\sigma^2 + 10 \log n_c - \frac{U}{2}\right)} \tag{11}$$

$$L_c = 10^{\frac{1}{20}\left(\frac{10 \log a + P_{AV}}{2} - 0{,}02875\sigma^2 + 10 \log n_c\right)} \tag{12}$$

Lorsque $n < 240$, la valeur du rapport valeur de crête/valeur moyenne du signal multiplex tend à augmenter. Il en est tenu compte lors de la conception de liaisons sans compression-extension en augmentant la charge de bruit que l'on fait passer de $-15 + 10 \log n$ à $-1 + 4 \log n$. Cette modification correspond à l'adjonction d'un facteur de valeur de crête de $14 - 6 \log n$ pour $n < 240$. Si l'on admet que ce facteur peut également s'appliquer à une bande de base multiplex constituée de voies avec compression-extension, on peut écrire:

$$L_c = 10^{\frac{1}{20}\left(\frac{10 \log a + P_{AV}}{2} - 0{,}02875\sigma^2 + 14 + 4 \log n_c\right)} \quad \text{lorsque} \quad n_c < 240 \tag{13}$$

On considère normalement que P_{AV} a une valeur de -15 dBm0. Les valeurs caractéristiques de 0,25 et de 5 dB ont respectivement été établies pour a et pour σ. Si l'on introduit ces valeurs dans la formule ci-dessous, on obtient:

$$L_c = \begin{cases} 10^{\frac{1}{20}(-11{,}2+10\log n_c)} & \text{lorsque } n_c > 240 \\ 10^{\frac{1}{20}(2{,}8+4\log n_c)} & \text{lorsque } n_c < 240 \end{cases} \quad (14)$$

2. Amélioration de la capacité d'une liaison existante lorsqu'on ajoute la compression-extension

Si un dispositif de compression-extension est ajouté à une liaison déjà existante en sorte que B_{RF} et que le rapport porteuse/bruit (C/N) demeurent inchangés, la procédure de conception spécifiée par [Skevington, 1979] est modifiée pour montrer que la valeur de X (rapport de la capacité en voies de la liaison avec compression-extension à celle de la liaison sans compression-extension) peut être fournie par les formules suivantes:

$$X^3\left(\frac{B_{RF}-8\times10^3 n}{B_{RF}-8\times10^3 Xn}\right)^2 = 10^{\frac{A-3{,}8}{10}} \quad \text{lorsque } n, n_c > 240 \quad (15)$$

$$X^{2,4}\left(\frac{B_{RF}-8\times10^3 n}{B_{RF}-8\times10^3 Xn}\right)^2 = 10^{\frac{A-3{,}8}{10}} \quad \text{lorsque } n, n_c < 240 \quad (16)$$

dans lesquelles A est, en dB, la valeur de l'amélioration subjective due à la compression-extension. (On admet que le facteur g «valeur de crête/valeur efficace» demeure inchangé pour des liaisons avec compression-extension.)

Pour une amélioration de 15 dB, la valeur de X varie d'un niveau quelque peu inférieur à 2 pour les porteuses de grande capacité à 2,5 environ pour les porteuses de faible capacité.

3. Modification de l'analyse de la transmission MRF-MF lorsque l'on utilise la concentration des conversations

Dans le cas de circuits par satellite MRF-MF mettant en œuvre des techniques de concentration des conversations, il est possible de développer l'analyse du § 6.1 du corps du présent Rapport en considérant que le facteur n de la formule (6) représente le nombre de voies avant l'application de la technique de concentration mais non le nombre de voies dans la bande de base qui module la porteuse. D'autre part, si l'application de la concentration nécessite une signalisation d'information dans les voies qui modulent la porteuse, il faut ajouter un facteur au numérateur de l'exposant de la formule (6). En règle générale, ce facteur sera inférieur à 0,5 dB.

Il est possible d'appliquer simultanément les techniques de compression-extension et de concentration des conversations. Dans ce cas, le calcul des liaisons s'effectue comme au § 1 de la présente Annexe, compte tenu des modifications indiquées ci-dessus.

4. Amélioration de la capacité d'une liaison existante lorsqu'on utilise la concentration des conversations

Si l'on applique la concentration des conversations à une liaison en service de telle sorte que B_{RF}, le rapport porteuse/bruit (C/N) et le rapport signal/bruit (S/N) demeurent inchangés, le rapport Y de la capacité en voies de la liaison avec concentration des conversations à celle de la liaison originale peut être obtenu au moyen de l'une des formules suivantes:

$$Y^{\frac{3}{2}} + \frac{8\times10^3 n}{B_{RF}-8\times10^3 n}Y - \frac{K B_{RF}}{B_{RF}-8\times10^3 n} = 0 \quad \text{lorsque } n > 240 \quad (17)$$

$$Y^{\frac{6}{5}} + \frac{8\times10^3 n}{B_{RF}-8\times10^3 n}Y - \frac{K B_{RF}}{B_{RF}-8\times10^3 n} = 0 \quad \text{lorsque } n, Kn < 240 \quad (18)$$

dans lesquelles K est le gain dû à la concentration des conversations et n le nombre de voies acheminées par la liaison originale. Si le gain dû à la concentration des conversations est égal à 2, la valeur de Y varie de 1,6 environ pour les porteuses à grande capacité à 1,8 pour les porteuses à faible capacité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SKEVINGTON, R. C. [1979] Compandors for FDM/FM voice traffic. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record; 12.5.1-12.5.5.

SECTION 4E: CARACTÉRISTIQUES ET MAINTENANCE DES STATIONS TERRIENNES

Avis et Rapports

AVIS 465-1

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE RÉFÉRENCE DE STATION TERRIENNE, A UTILISER POUR LA COORDINATION ET POUR L'ÉVALUATION DES BROUILLAGES DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 2 ET 10 GHz ENVIRON

(Programme d'études 1A/4)

(1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, pour effectuer les études de coordination et pour évaluer les brouillages mutuels entre les systèmes de radiocommunication par satellite et entre les stations terriennes de ces systèmes et les stations d'autres services qui partagent la même bande de fréquences, il peut être nécessaire d'utiliser un diagramme de rayonnement unique pour l'antenne de la station terrienne;

b) que, pour déterminer la distance de coordination et évaluer les brouillages entre stations terriennes et stations des services de Terre, il peut y avoir intérêt à utiliser un diagramme de rayonnement établi sur la base du niveau dépassé par un faible pourcentage des crêtes des lobes latéraux;

c) que, pour effectuer les études de coordination et pour évaluer les brouillages entre stations terriennes et stations spatiales, il peut y avoir intérêt à utiliser, pour la région voisine du lobe principal, un diagramme de rayonnement établi sur la base de l'enveloppe de la puissance de crête dans les lobes latéraux de cette région;

d) que, pour les angles par rapport à l'axe du faisceau principal dans lesquels les effets inhérents au système d'alimentation utilisé n'apportent pas une contribution notable au niveau de puissance dans les lobes latéraux, les diagrammes de rayonnement établis pour de nombreuses antennes de stations terriennes existantes ne font apparaître qu'une faible dispersion par rapport à un diagramme généralisé simple, tout au moins dans la gamme des fréquences comprises entre 2 et 10 GHz;

e) que, pour les systèmes du type Cassegrain et pour les angles par rapport à l'axe du faisceau principal dans lesquels l'augmentation de puissance dans les lobes latéraux résulte principalement de la diffraction, les diagrammes de rayonnement d'un certain nombre d'antennes existantes font aussi apparaître une assez bonne concordance;

f) que, pour les grands angles, il faut tenir compte de la possibilité de réflexions locales sur le sol;

g) que les antennes à diagrammes de rayonnement optimal assureront le maximum d'efficacité dans l'utilisation du spectre radioélectrique et de l'orbite des satellites géostationnaires,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. qu'en l'absence de renseignements précis sur le diagramme de rayonnement de l'antenne d'une station terrienne il convient d'utiliser un diagramme de rayonnement de référence unique:

1.1 pour effectuer les études de coordination et évaluer les brouillages entre stations terriennes du service fixe par satellite et stations d'autres services qui partagent la même bande de fréquences;

1.2 pour effectuer les études de coordination et évaluer les brouillages entre systèmes du Service fixe par satellite;

2. que le diagramme de rayonnement de référence représenté à la Fig. 1 (d'après le Rapport 391) soit adopté provisoirement, pour des angles entre la direction considérée et l'axe du faisceau principal au moins égaux à 1°, tout au moins dans la gamme des fréquences comprises entre 2 et 10 GHz, lorsque le rapport du diamètre de l'antenne à la longueur d'onde, D/λ, est supérieur à 100.

Note 1. – On admettra que le diagramme de rayonnement de référence possède une symétrie de révolution.

Note 2.– Le diagramme de rayonnement de référence devrait être utilisé avec prudence dans le domaine angulaire où le système d'alimentation particulier mis en œuvre risque de produire une diffraction relativement forte.

Note 3. – Les quelques renseignements dont on dispose conduisent à penser que le diagramme de rayonnement de référence représenté sur la Fig. 1 pourrait être aussi utilisé à titre provisoire pour les fréquences de la gamme 10 à 30 GHz.

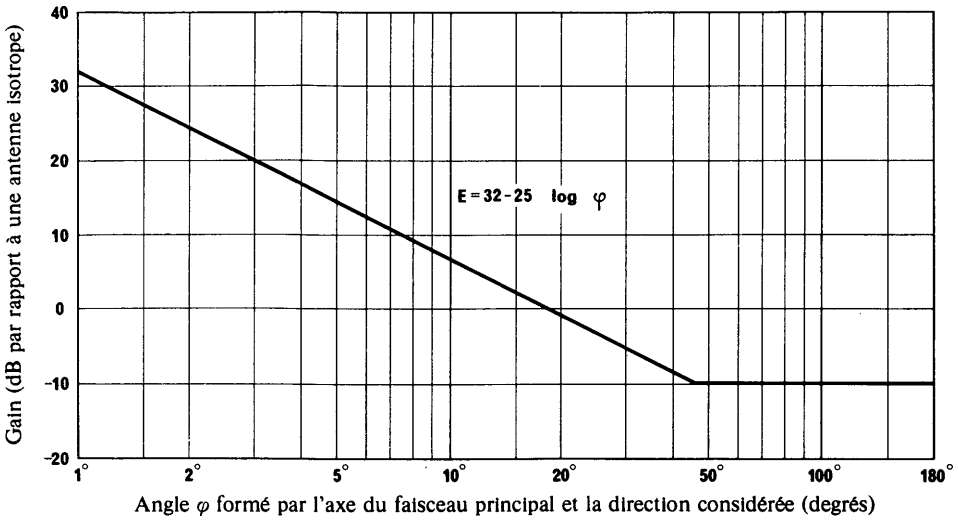


FIGURE 1 — *Diagramme de rayonnement de référence provisoire*

$E = 32–25 \log \varphi$

AVIS 580

DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT A UTILISER COMME OBJECTIFS DE CONCEPTION POUR LES ANTENNES DES STATIONS TERRIENNES FONCTIONNANT AVEC DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

(Question 1/4 et Programme d'études 1A/4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'utilisation efficace du spectre radioélectrique est un facteur essentiel de la gestion de l'orbite des satellites géostationnaires;

b) que la caractéristique de lobes latéraux des antennes de stations terriennes est un des facteurs principaux pour la détermination de l'espacement minimal entre satellites et, par conséquent, de la mesure dans laquelle le spectre radioélectrique peut être efficacement utilisé;

c) que le diagramme de rayonnement des antennes influe directement à la fois sur la p.i.r.e. en dehors de l'axe principal de rayonnement et sur la puissance captée par les lobes latéraux;

d) qu'en utilisant les techniques courantes de conception, on peut envisager de construire des antennes à caractéristiques de lobes latéraux améliorées, mais que l'application pratique de ces techniques pourrait entraîner un certain accroissement de prix;

e) que des données sur des diagrammes d'antenne de stations terriennes à caractéristiques de lobes latéraux améliorées sont présentées dans la Rapport 391;

f) que le CCIR étudie les avantages potentiels des antennes à caractéristiques de lobes latéraux améliorées dans le but d'une meilleure utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. Pour les antennes ayant un rapport D/λ supérieur à 150:

que les nouvelles antennes de stations terriennes fonctionnant avec un satellite géostationnaire installées après 1987 * devraient avoir un objectif de conception tel que le gain de 90% des crêtes des lobes latéraux n'excède pas:

$$G = 29 - 25 \log \varphi \qquad \text{dBi}$$

(φ étant l'angle par rapport à l'axe du lobe principal et G le gain par rapport à une antenne isotrope).

Cette condition devrait être satisfaite pour n'importe quelle direction en dehors de l'axe à moins de 3° de l'orbite des satellites géostationnaires et pour laquelle on a: $1° \leqslant \varphi \leqslant 20°$, comme indiqué à la Fig. 1;

2. Pour les antennes ayant un rapport D/λ inférieur à 150:

que les renseignements ne sont pas disponibles actuellement pour permettre de déterminer aussi un objectif de conception pour ces antennes plus petites et qu'en conséquence, les administrations sont instamment priées d'examiner cette question et de fournir des renseignements pour accélérer les études au cours de la période 1982-86.

Note 1. – Cet Avis ne s'applique pas aux antennes existantes.

Note 2. – Le présent Avis se rapporte principalement aux critères de partage de l'orbite des satellites géostationnaires. Cependant, il convient d'insister sur le fait que l'application de cet Avis ne doit pas influencer défavorablement les caractéristiques d'antennes en relation avec la coordination des fréquences entre le service fixe par satellite et les services de Terre (voir l'Avis 465).

Note 3. – L'expression «90% des crêtes des lobes latéraux» signifie «90% de toutes les crêtes effectives» observées dans la totalité du secteur angulaire défini dans cet Avis.

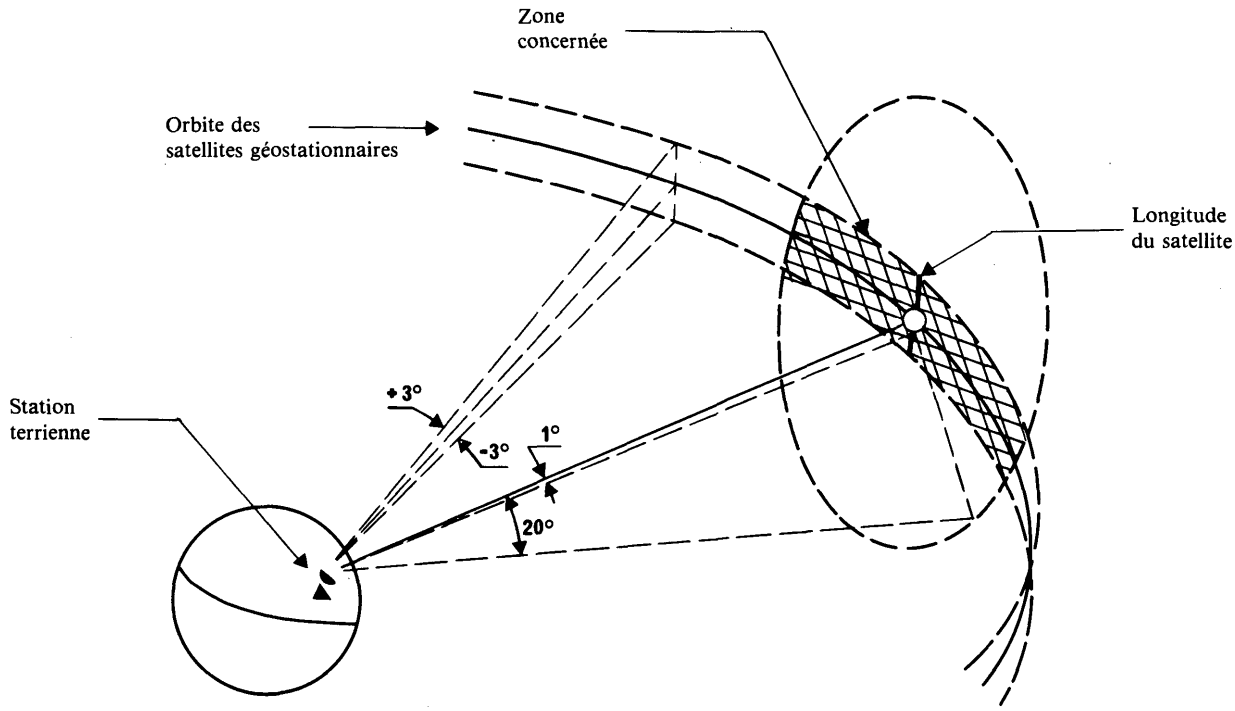


FIGURE 1 – *Zone au voisinage de l'orbite des satellites géostationnaires pour laquelle s'applique l'objectif de conception pour les antennes de station terrienne*

* Cette date est provisoire et fera l'objet d'un réexamen lors de la XVI[e] Assemblée plénière du CCIR.

RAPPORT 391-4

DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DES ANTENNES DE STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE A UTILISER DANS LES ÉTUDES DE BROUILLAGE ET DANS LA DÉTERMINATION D'UN OBJECTIF DE CONCEPTION

(Question 1/4 et Programme d'études 1A/4)

(1966-1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

Pour calculer la distance de coordination ou pour évaluer les brouillages entre stations terriennes et stations de faisceaux hertziens et pour étudier la coordination entre stations terriennes et stations spatiales de différents systèmes à satellites fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences, il faut connaître le gain de l'antenne de la station terrienne dans la direction intéressante. Il est également souhaitable de connaître les caractéristiques de rayonnement dans les plans autres que les plans principaux, en particulier pour calculer les brouillages entre systèmes à satellites.

De plus il est nécessaire, comme il en est discuté dans le Rapport 390, de rassembler des informations sur les caractéristiques de nouvelles antennes, afin d'établir un objectif de conception approprié pour le niveau des lobes latéraux.

2. Diagrammes caractéristiques de rayonnement des antennes

Pour calculer la distance de coordination et évaluer les brouillages mutuels entre stations terriennes et faisceaux hertziens de Terre, des données sur les diagrammes de rayonnement des antennes des stations terriennes sont nécessaires. Il convient d'utiliser de préférence les données du diagramme de rayonnement réel.

Si l'on ne dispose pas de telles données, on peut utiliser un diagramme de rayonnement de référence. Dans ce cas, le diagramme de référence représentant un niveau qui n'est dépassé que par un faible pourcentage des crêtes des lobes latéraux semble approprié. Si l'on utilise un diagramme de référence de ce genre pour les calculs de distance de coordination et de brouillages, le risque que l'antenne réelle produise des niveaux de brouillage dépassant les valeurs calculées est suffisamment réduit.

2.1 *Représentation, par un diagramme de rayonnement de référence, des valeurs mesurées pour des antennes ayant un grand rapport diamètre/longueur d'onde ($D/\lambda > 100$)*

Des informations sur les antennes de 18 grandes stations terriennes ont été obtenues à 6,4 GHz en 1976 avec le satellite ATS-6, le diamètre des antennes étant de 26 à 32 mètres (D/λ compris entre 550 et 670). Le niveau dépassé par 10% des crêtes de chaque antenne, sur chaque fréquence, est indiqué sur la Fig. 1. Le diagramme de rayonnement de référence

$$G \text{ (gain par rapport à une antenne isotrope)} = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{dB} \qquad (1)$$

est également représenté sur cette figure; φ est l'angle (en degrés) formé par l'axe du faisceau principal et la direction considérée. Il faut admettre que cette formule s'applique uniquement au-delà de la crête du premier lobe latéral, c'est-à-dire pour φ (degrés) $\approx 100\,\lambda/D$ et au-delà. Par ailleurs, on n'a jamais le droit d'admettre que le gain de l'antenne de référence tombe à des valeurs inférieures à -10 dB par rapport au gain isotrope. La gamme de φ est considérée jusqu'au point où le gain est de -10 dB, cette limite étant choisie pour tenir compte du réfléchissement local du sol.

Dans les cas où la valeur de D/λ n'est pas donnée, on peut la déterminer d'après l'expression $20 \log (D/\lambda) \approx G_0 - 8$, où G_0 est le gain (en dB) de l'antenne dans le faisceau principal.

On peut considérer que ce diagramme de rayonnement de référence représente le niveau dépassé par 10% des crêtes des lobes latéraux du diagramme de rayonnement réel des grandes antennes de station terrienne.

Dans la région la plus proche du faisceau principal, c'est-à-dire φ compris entre 0,2° et 1°, la valeur de 10% équivaut pratiquement à la valeur de crête absolue en raison du petit nombre de crêtes dans cette région. La valeur médiane, c'est-à-dire la valeur dépassée par 50% des valeurs de crête, se situe approximativement à 5 dB au-dessous du diagramme de rayonnement de référence dans tout le domaine angulaire où φ est supérieur à 1° et inférieur à 10°; dans ce domaine, certaines des plus grandes valeurs de crête peuvent dépasser de 10 dB le diagramme de référence. Cependant, la CAMR-79 a adopté une méthode pour évaluer le diagramme de rayonnement à l'intérieur de cette région angulaire; cette méthode est donnée dans l'Annexe I.

On possède aussi quelques résultats sur les diagrammes de rayonnement d'antennes aux fréquences supérieures à 10 GHz, lorsque D/λ est supérieur à 100; ces diagrammes concordent bien avec l'expression $32 - 25 \log \varphi$, comme le montre la Fig. 2.

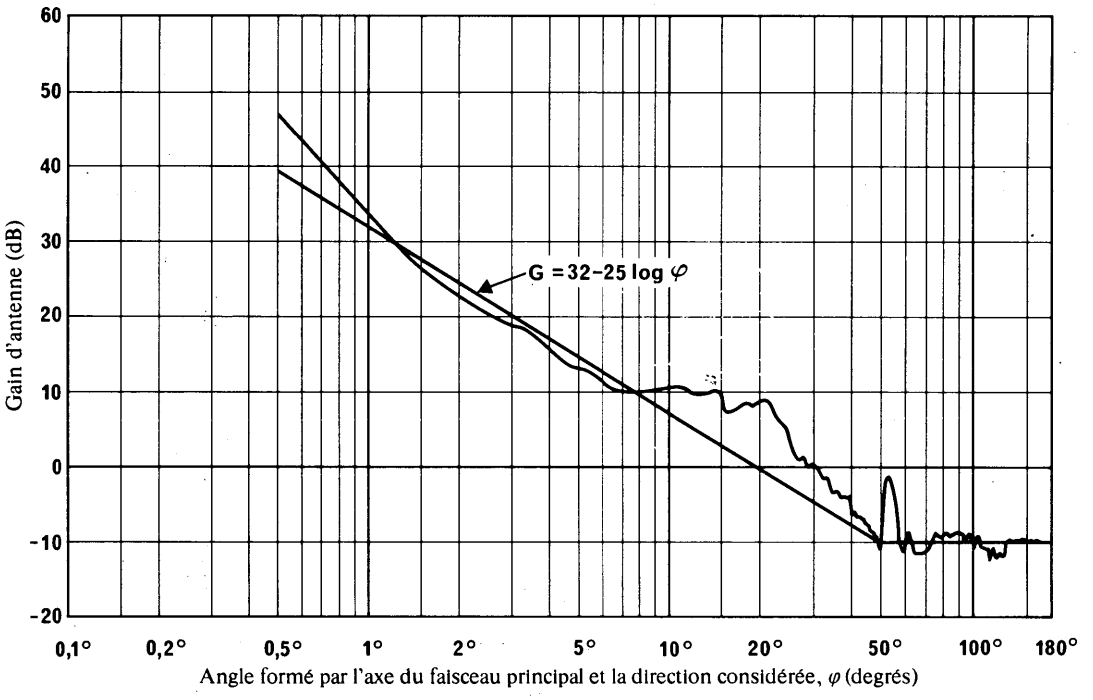


FIGURE 1 — *Données statistiques portant sur les diagrammes de rayonnement de 18 antennes Cassegrain de grandes stations terriennes fonctionnant à 6,4 GHz (D/λ = 550 à 670)*

Niveaux dépassés par 10 % des valeurs de crête dans les lobes latéraux (moyennes sur des intervalles d'un degré)

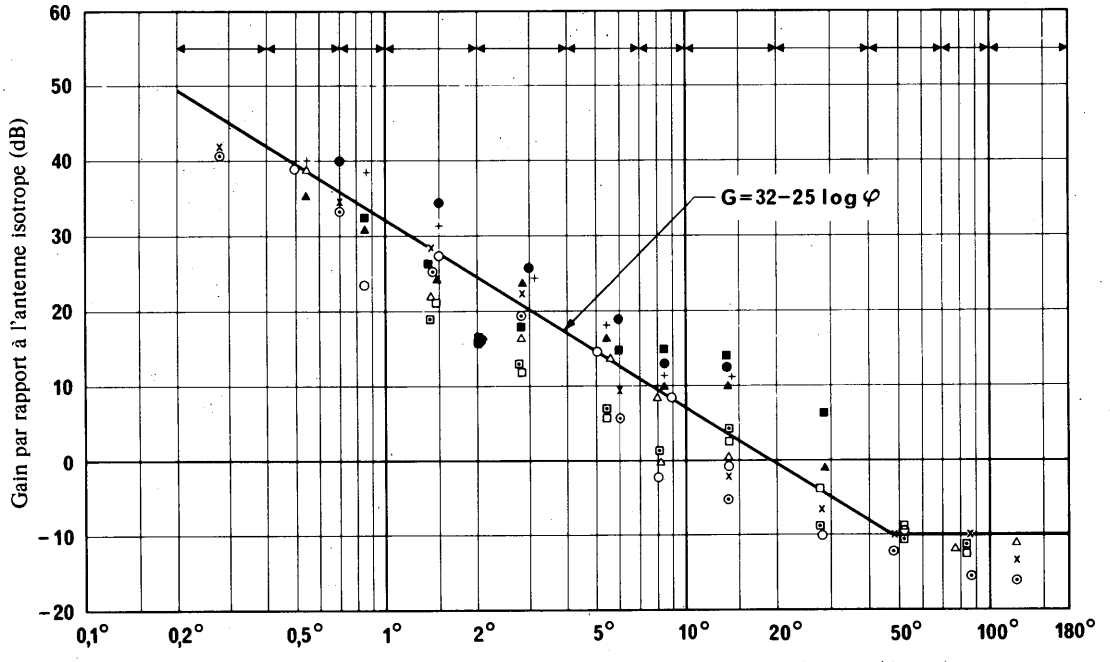


FIGURE 2 — *Données statistiques extraites de diagrammes de rayonnement d'antenne Cassegrain de station terrienne fonctionnant au-dessus de 10 GHz*

Niveaux des crêtes de rayonnement des lobes latéraux dépassés de 10 %

Note. — Il convient de noter que les points marqués sur la figure peuvent correspondre à des échantillons à angles différents et à des nombres de crêtes différents.

2.2 *Grandes antennes à caractéristiques de lobes latéraux améliorées ($D/\lambda > 100$)*

Une antenne à réflecteur alimenté par une source excentrée a des caractéristiques de faibles lobes latéraux à cause de l'absence de blocage de l'ouverture. Un exemple de caractéristiques de lobes latéraux de ce type d'antenne est donné Fig. 3a. Cette antenne a un réflecteur secondaire conformé et une source à périscope alors que le réflecteur principal est une partie d'un paraboloïde de révolution. Des détails supplémentaires sur ce type d'antenne peuvent être trouvés en Annexe I du Rapport 390.

Cependant un soin poussé apporté à la définition des différents sous-ensembles peut permettre une amélioration des caractéristiques, même dans le cas d'une antenne Cassegrain conventionnelle, comme montré dans les Fig. 3b, 3c et 3d.

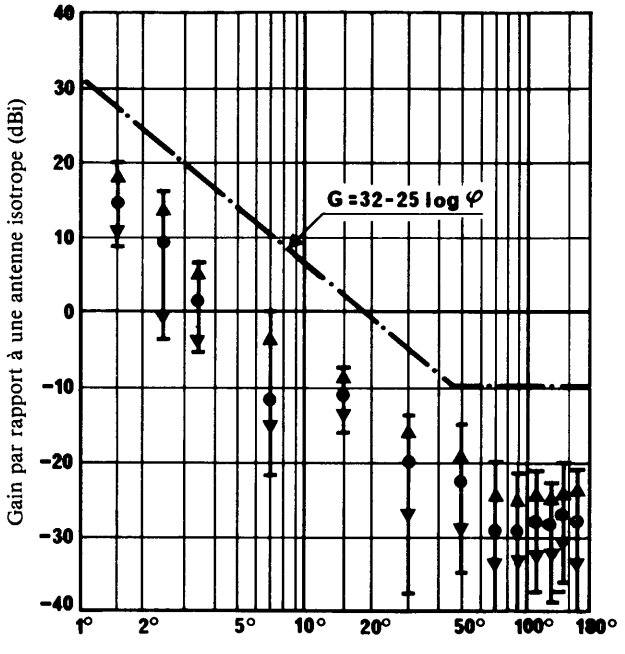
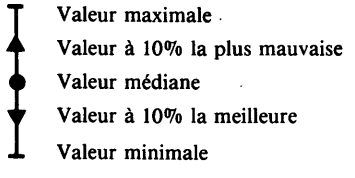


FIGURE 3a – *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux pour une antenne Cassegrain avec alimentation excentrée pour $D/\lambda = 1131$ et $f = 29{,}5$ GHz (plan en azimut)*



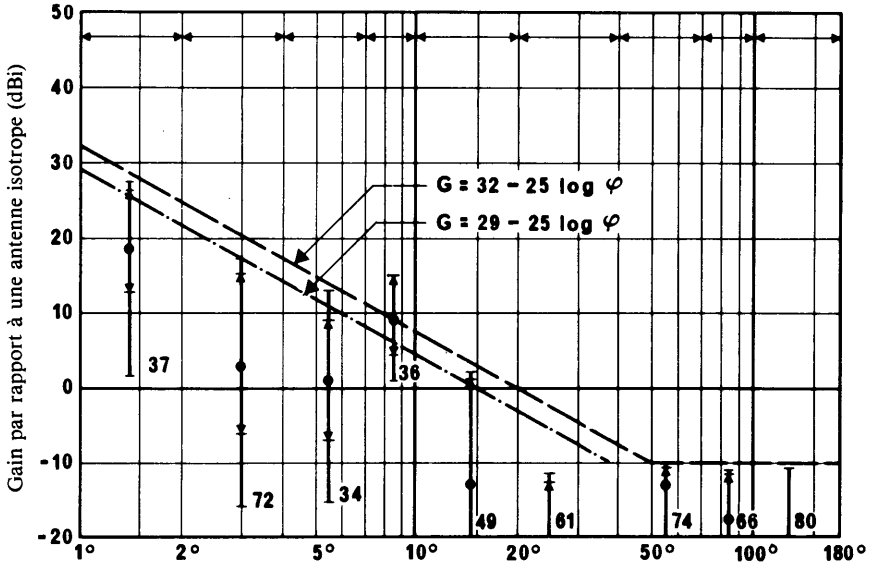


FIGURE 3b – *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux pour une antenne «Cassegrain compacte» de dimensions moyennes avec $D/\lambda = 214$ et $D = 4{,}5$ m, pour $f = 14{,}25$ GHz*

– Valeur maximale
▲ Valeur à 10% la meilleure
● Valeur médiane
37, 72... Nombre d'échantillons

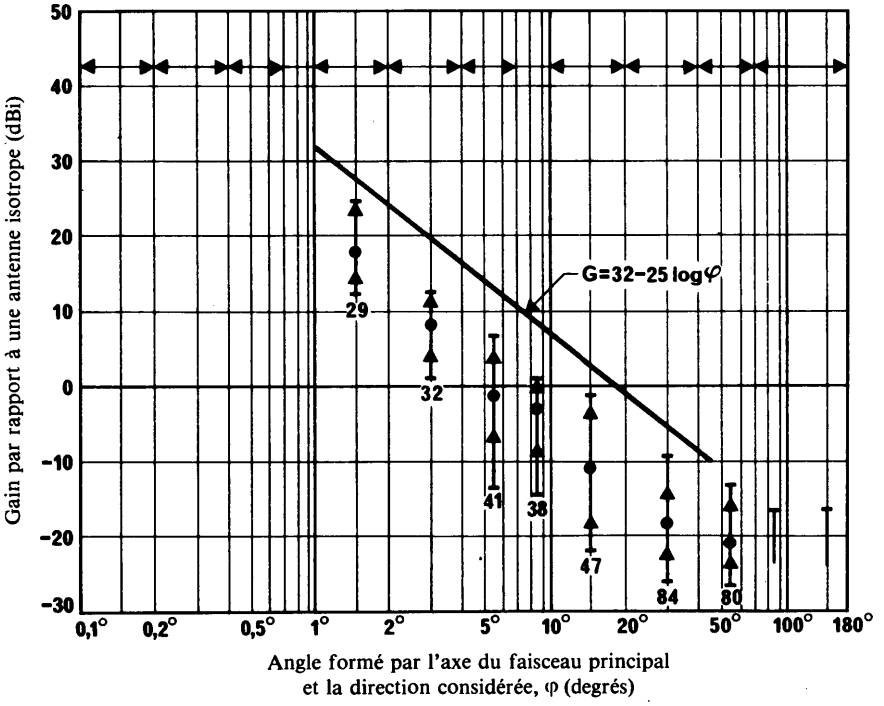


FIGURE 3c – *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux*

Antenne de 34 m
6 425 MHz
Copolarisation

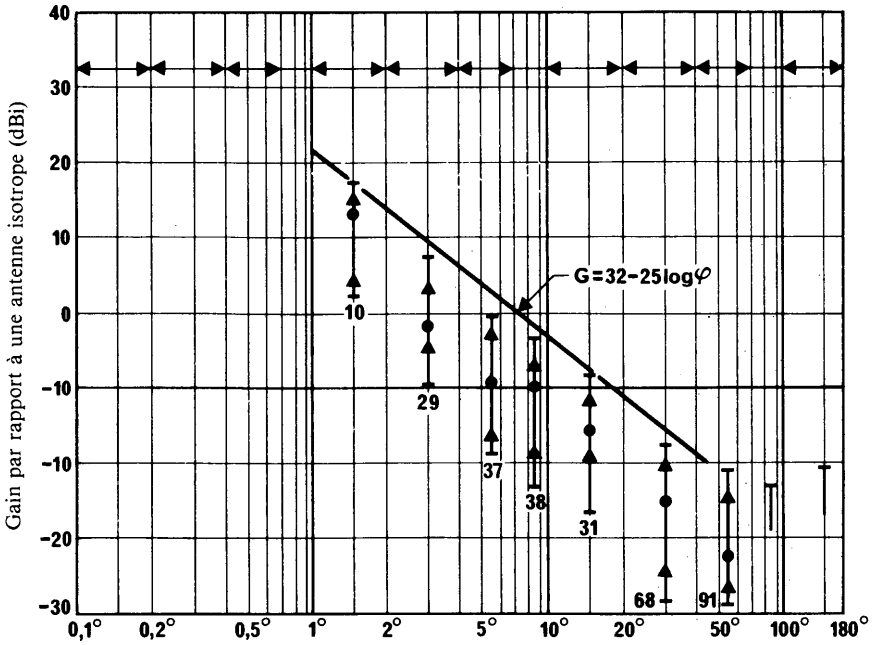


FIGURE 3d – *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux*

Antenne de 34 m
3 990 MHz
Copolarisation

2.3 *Diagramme de rayonnement de référence pour $D/\lambda < 100$*

Des études théoriques, ainsi que les renseignements disponibles sur les antennes de faisceaux hertziens (Rapport 614) donnent à penser que le diagramme de référence représenté par la formule du § 2.1 est susceptible de conduire à des résultats erronés si on cherche à l'appliquer à des antennes pour lesquelles $D/\lambda < 100$. Une nouvelle formule a été proposée pour le diagramme de référence, à savoir:

$$G = 52 - 10 \log (D/\lambda) - 25 \log \varphi \qquad \text{dB} \qquad (2)$$

A titre d'exemple, la Fig. 4 montre les résultats de la distribution des crêtes des lobes latéraux pour une petite antenne ayant un réflecteur parabolique symétrique conventionnel de diamètre de 3,3 m ($D/\lambda = 66$).

On peut trouver dans l'Annexe I au Rapport 614 d'autres informations sur les bases théoriques de cette formule, laquelle ne doit pas être utilisée lorsque $D/\lambda > 100$.

Il faut admettre que cette formule s'applique uniquement au-delà de la crête du premier lobe latéral, c'est-a-dire pour φ (degrés) $\approx 100\ \lambda/D$ et au-delà. Par ailleurs, on n'a jamais le droit d'admettre que le gain de l'antenne de référence tombe à des valeurs inférieures à -10 dB par rapport au gain isotrope.

Dans les cas où la valeur de D/λ n'est pas donnée, on peut la déterminer d'après l'expression $20 \log (D/\lambda) \approx G_0 - 7{,}7$ où G_0 est le gain (en dB) de l'antenne dans le faisceau principal.

2.4 *Antennes ayant des caractéristiques des lobes latéraux améliorées ($D/\lambda < 100$)*

Pour certaines applications futures, il peut être nécessaire d'améliorer les caractéristiques des lobes latéraux des antennes des petites stations terriennes. A titre d'exemple, la distribution statistique des crêtes des lobes latéraux, mesurée sur une antenne spécialement conçue avec alimentation excentrée, est représentée Fig. 5. Pour de plus amples détails sur ce type d'antenne, se reporter à l'Annexe I au Rapport 390.

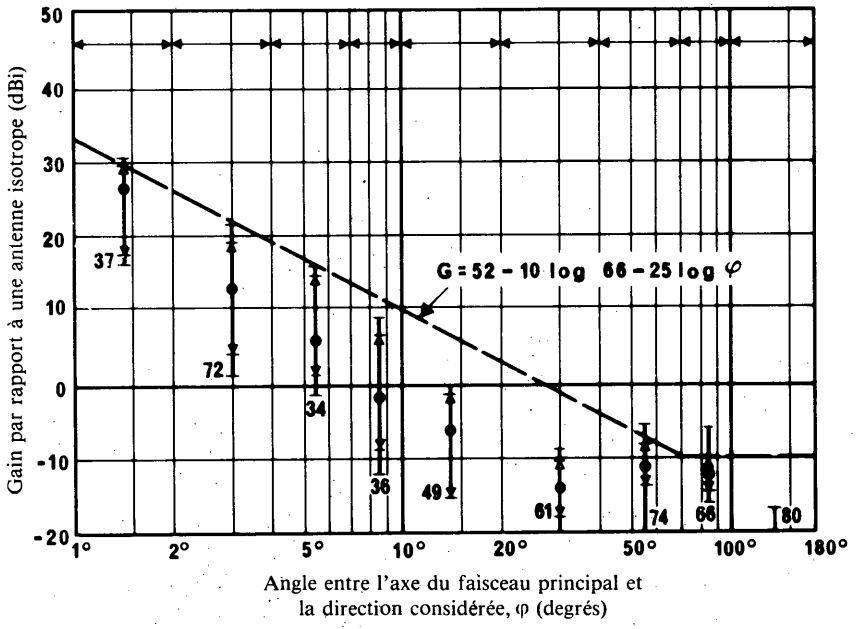


FIGURE 4 – *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux pour une petite antenne «Cassegrain compacte» avec $D/\lambda = 66$ et $D = 3{,}3$ m, pour $f = 6{,}0$ GHz*

– Valeur maximale
▲ Valeur à 10% la meilleure
● Valeur médiane
37, 72... Nombre d'échantillons

2.5 *Propriétés statistiques générales des lobes latéraux des antennes*

Lors du calcul des brouillages mutuels entre systèmes de faisceau hertzien et systèmes de communication par satellite, il est préférable de connaître les propriétés statistiques des niveaux de rayonnement dans les lobes latéraux des antennes ainsi que celles des crêtes de rayonnement dans les lobes latéraux. Tel est particulièrement le cas lorsqu'il existe plusieurs sources de brouillage. Des mesures portant sur un certain nombre d'antennes ainsi qu'une étude théorique ont montré que la distribution statistique des amplitudes dans les lobes latéraux d'une antenne est exprimée de manière approximative par la fonction de distribution de Rayleigh. La valeur médiane dépassée par 50% des crêtes de rayonnement dans les lobes latéraux est plus élevée d'environ 2 dB que celle de la distribution du niveau dans les lobes latéraux.

A partir des renseignements susmentionnés, des courbes de référence représentant les caractéristiques des lobes latéraux des antennes de stations terriennes ont été calculées et sont reproduites dans la Fig. 6 [Shinji et autres, 1976].

On peut s'attendre à trouver une relation analogue pour les antennes plus petites et dont le rapport D/λ est inférieur à 100.

Des mesures faites sur des antennes paraboliques à source excentrée [Grace et Miller, 1966] et sur des antennes asymétriques de type grégorien ont montré que les crêtes de lobes latéraux de ces types d'antenne suivent la distribution statistique log-normale. Cette distribution est tenue à la fois dans la région des lobes latéraux dépendants de l'angle et celle des lobes latéraux indépendants de l'angle et permet la description des caractéristiques des lobes latéraux en terme de valeur moyenne et d'écart type de statistiques de crêtes de lobes latéraux.

2.6 *Considérations relatives à la polarisation*

Le diagramme de rayonnement de référence est celui que l'on obtient dans le plan principal de l'antenne avec une antenne d'essai ayant la même polarisation. Les brouillages mutuels entre stations, en particulier entre stations terriennes et stations spatiales des différents systèmes, dépendent directement de la discrimination obtenue par les lobes latéraux des systèmes d'antenne respectifs. Pour les polarisations identiques (c'est-à-dire polarisations concordantes), le diagramme de rayonnement de référence donné par la formule du § 2.1 peut être utilisé de manière appropriée. Lorsque des systèmes fonctionnent avec des polarisations orthogonales, on peut s'attendre à un renforcement de cette discrimination. On ne possède actuellement que peu de données sur ce sujet et il n'est pas possible de mettre au point un diagramme de référence similaire. La question de la polarisation est étudiée en détail dans le Rapport 555.

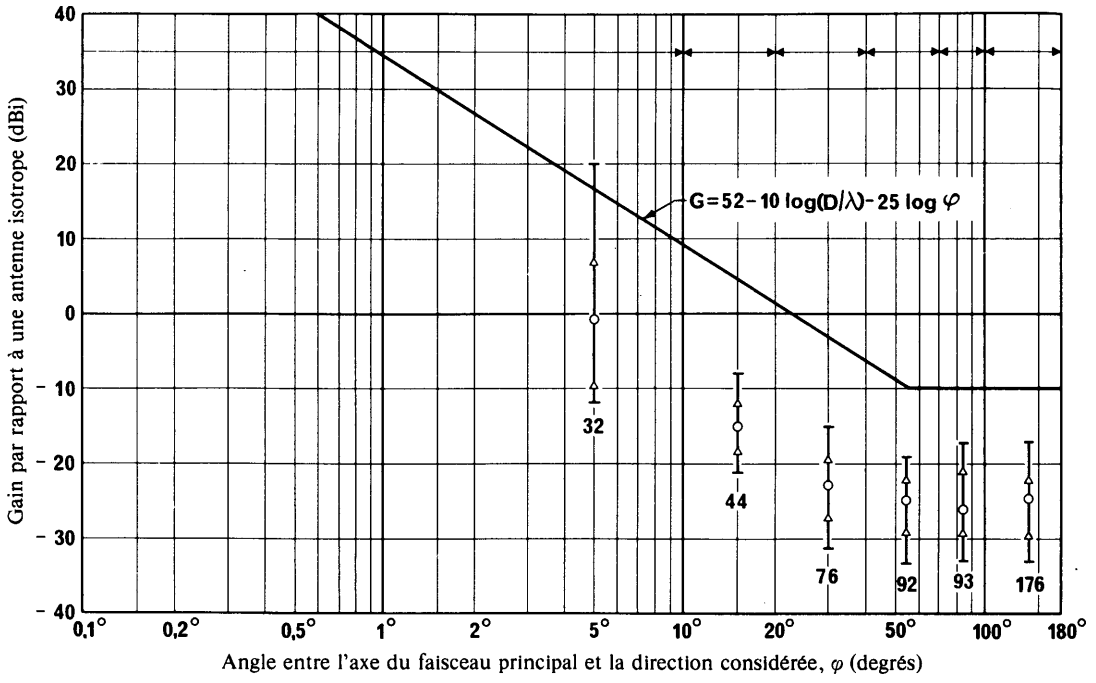
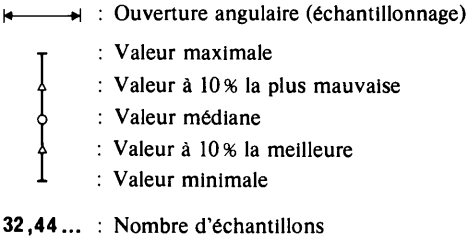


FIGURE 5 — *Distribution statistique des crêtes des lobes latéraux pour une antenne spécialement conçue ayant* $D/\lambda = 66$



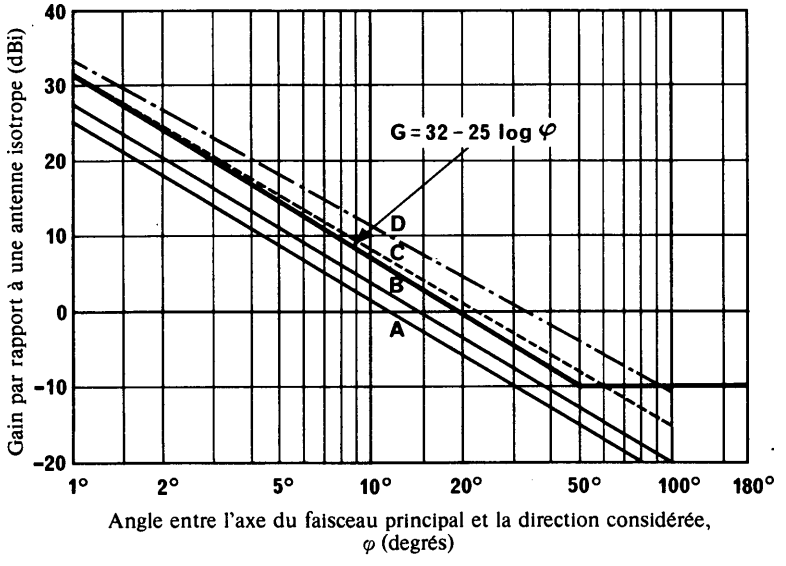


FIGURE 6 – *Rapports statistiques entre les lobes latéraux pour des antennes de station terrienne classiques*

A = Médiane (50%) de la distribution des lobes latéraux
B = Médiane (50%) de la distribution des crêtes des lobes latéraux
C = Valeur à 10% la plus mauvaise de la distribution des crêtes des lobes latéraux
D = Plus mauvaise valeur de la distribution des crêtes des lobes latéraux

3. Objectifs de conception pour les futures antennes de station terrienne

Le nouvel Avis 580, prépare sur la base des informations contenues dans le présent Rapport et des travaux effectués par le Groupe de travail intérimaire 4/1 concernant l'importance du diagramme de rayonnement de l'antenne dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, a été adopté. Cet Avis traite des diagrammes de rayonnement à utiliser comme objectif de conception pour les antennes de stations terriennes. Afin de réviser ultérieurement ce nouvel Avis, les administrations sont invitées à continuer de soumettre des données relatives aux diagrammes d'antenne des stations terriennes possédant des caractéristiques de lobes latéraux améliorées et utilisant des polarisations orthogonales.

L'analyse des résultats d'essai effectués sur un grand nombre d'antennes du système INTELSAT de type A et de type B dont les valeurs de D/λ variaient de 400 environ à 700 et de 160 à 280, est représentée sur les Fig. 7 et 8 pour les antennes INTELSAT de type A à diagrammes de rayonnement copolaire (polarisation circulaire dans les deux sens) et sur les Fig. 9 et 10 pour les antennes INTELSAT de type B en rayonnement copolaire (polarisation circulaire lévogyre).

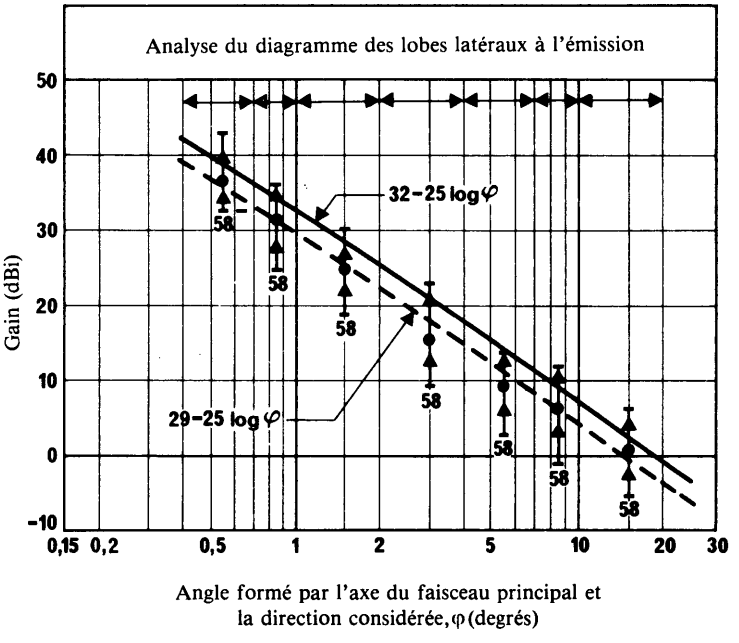


FIGURE 7 – *Distribution des niveaux des lobes latéraux dans le diagramme copolaire à polarisations circulaires orthogonales pour des antennes INTELSAT de type A*

Ouverture angulaire (échantillonnage)

Valeur maximale
Valeur à 10% la plus mauvaise
Valeur médiane
Valeur à 10% la meilleure
Valeur minimale

58, Nombre d'échantillons

Données d'antenne:

Type:	INTELSAT Standard A
Diamètre:	approx. 30 m
Fréquence:	5 990 – 6 400 MHz
Polarisation:	polarisations dextrogyre et levogyre

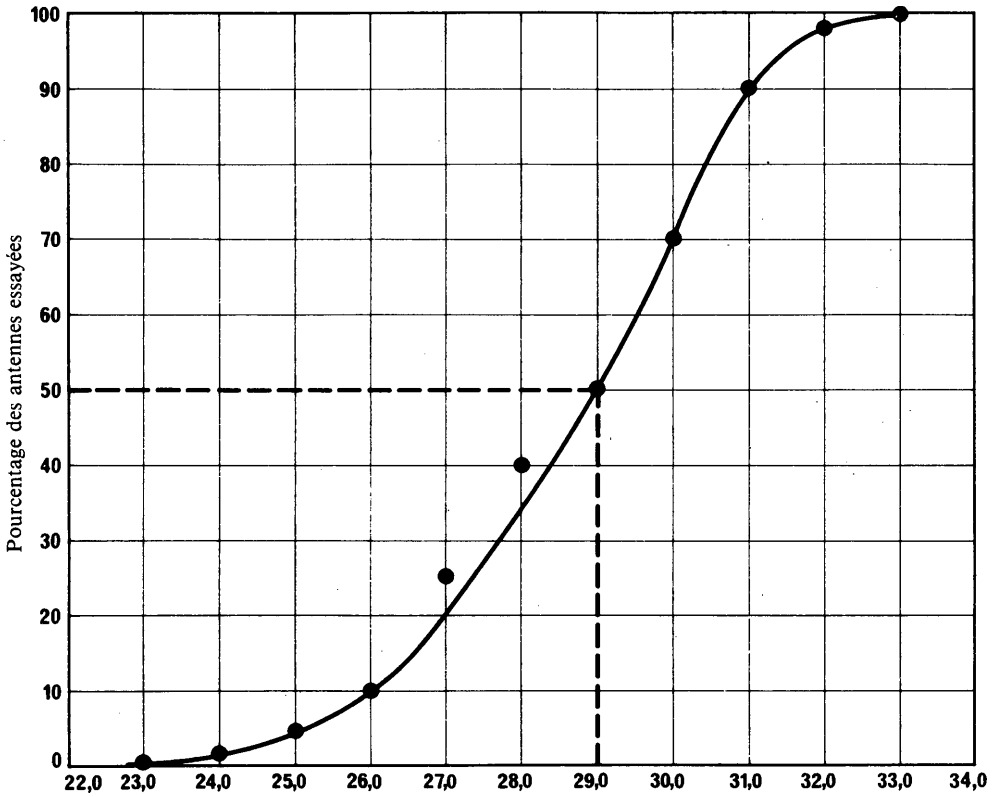


FIGURE 8 – *Antenne INTELSAT de type A: diagrammes copolaires*

Formule d'enveloppe du gain: $x - 25{,}0 \log \varphi$

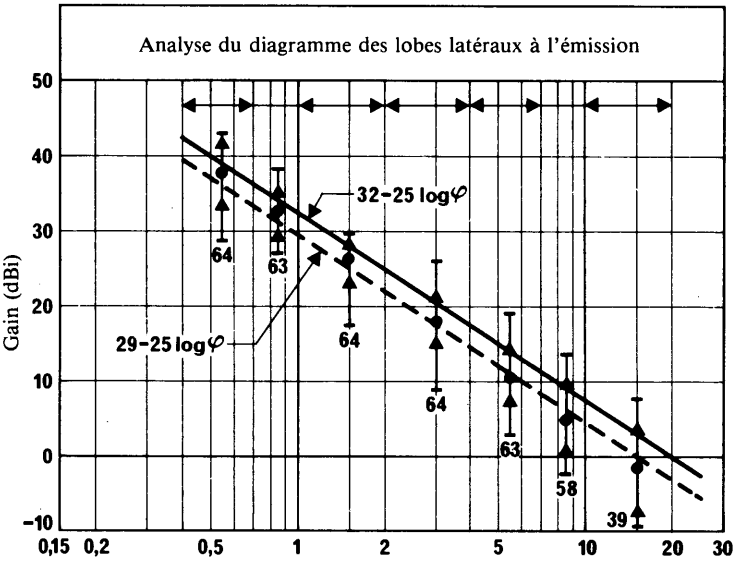


FIGURE 9 – *Distribution des niveaux des lobes latéraux dans le diagramme copolaire à polarisations circulaires d'antennes INTELSAT de type B*

Ouverture angulaire (échantillonnage)

Valeur maximale

Valeur à 10% la plus mauvaise

Valeur médiane

Valeur à 10% la meilleure

Valeur minimale

58, Nombre d'échantillons

Données d'antenne:

Type:	INTELSAT Standard B
Diamètre:	approx. 13 m
Fréquence:	5 990 – 6 400 MHz
Polarisation:	polarisation circulaire lévogyre

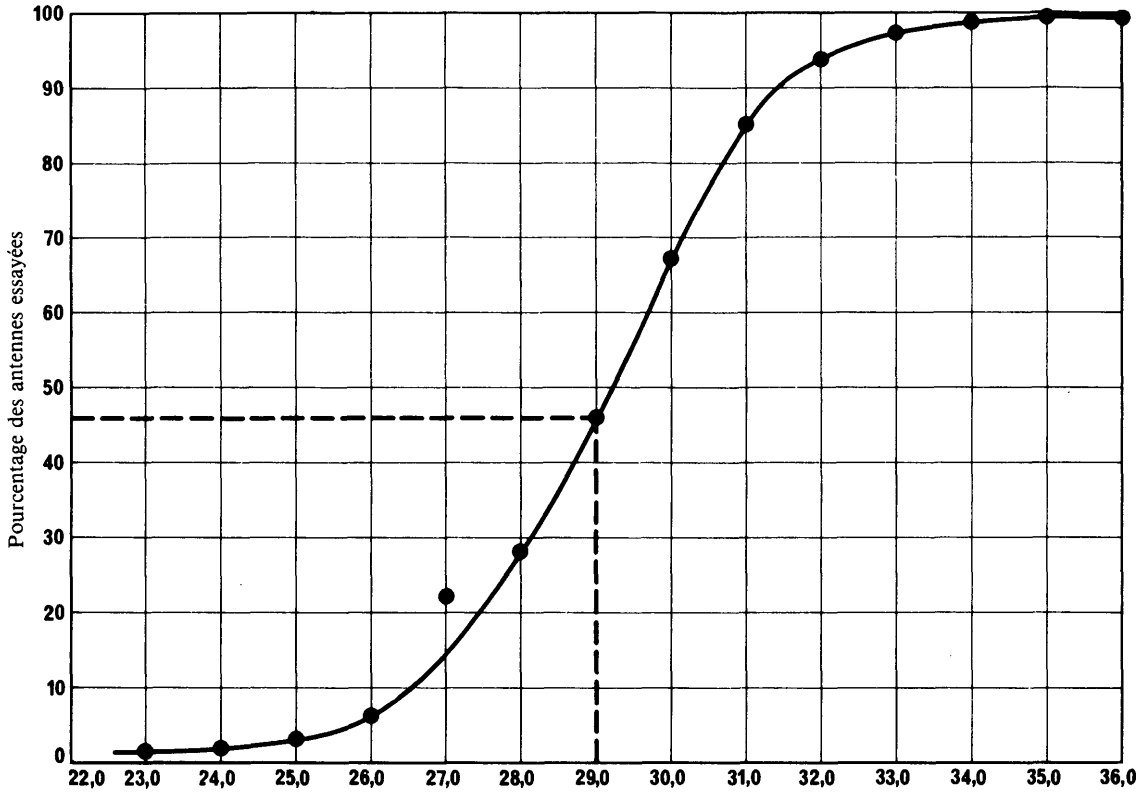


FIGURE 10 – *Antenne INTELSAT de type B: diagrammes copolaires*

Formule d'enveloppe du gain: $x - 25{,}0 \log \varphi$

4. Conclusions

Vu le grand nombre d'applications impliquant un partage des bandes de fréquences, des études sont nécessaires, aussi bien pour les antennes ayant un rapport $D/\lambda < 100$, que pour celles ayant un rapport $D/\lambda < 100$, afin que l'on dispose du diagramme de référence le plus utile et le plus commode. L'Annexe I au Rapport 390 contient un exposé intéressant sur les caractéristiques des lobes latéraux.

Afin que les renseignements contenus dans le présent Rapport (ainsi que dans les Avis établis sur cette base) soient représentatifs des pratiques courantes, les administrations sont invitées à présenter des données relatives aux diagrammes d'antennes mesurés, notamment en ce qui concerne les caractéristiques de crête des lobes latéraux et les caractéristiques des diagrammes de polarisation. Les gains des lobes latéraux devraient être donnés par rapport au gain de l'antenne isotrope et ramenés à la bride du cornet. De plus, il est demandé aux administrations de fournir de brèves descriptions techniques des antennes, notamment les moyens utilisés pour obtenir une caractéristique de faibles lobes latéraux. Il serait préférable de présenter les valeurs de crête dans les lobes latéraux sous forme de distribution statistique de ces valeurs de crête, dans des intervalles appropriés d'écarts angulaires par rapport à l'axe du faisceau (voir la Fig. 11). Une méthode d'évaluation des données pour les lobes latéraux tenant compte de la courbe des caractéristiques des lobes latéraux de l'antenne dans une région angulaire donnée, est fournie à l'Annexe II. Il est préférable que les administrations tiennent compte de la courbe des caractéristiques des lobes latéraux d'antenne pour préparer les données statistiques destinées à l'élaboration du présent rapport, ou sinon, qu'elles indiquent la méthode de traitement utilisée. Ces renseignements devraient être complétés par des données pertinentes, par exemple le diamètre et le type de l'antenne, la fréquence de travail, la polarisation, avec, si possible, une indication sur les effets imputables au terrain.

Des mesures faites par INTELSAT sur 93 antennes INTELSAT installées après 1977 montrent que les caractéristiques de performance dans les lobes latéraux, la région angulaire testée étant approximativement de 1 à 20° par rapport au centre du faisceau principal, correspondent à la valeur actuellement recommandée de $G = 32 - 25 \log \varphi$ (c'est-à-dire que 90% au moins des crêtes de leurs lobes latéraux sont conformes à cette formule) et que près de la moitié de ces antennes répondent à la nouvelle enveloppe de gain de référence de $G = 29 - 25 \log \varphi$ pour cette région angulaire.

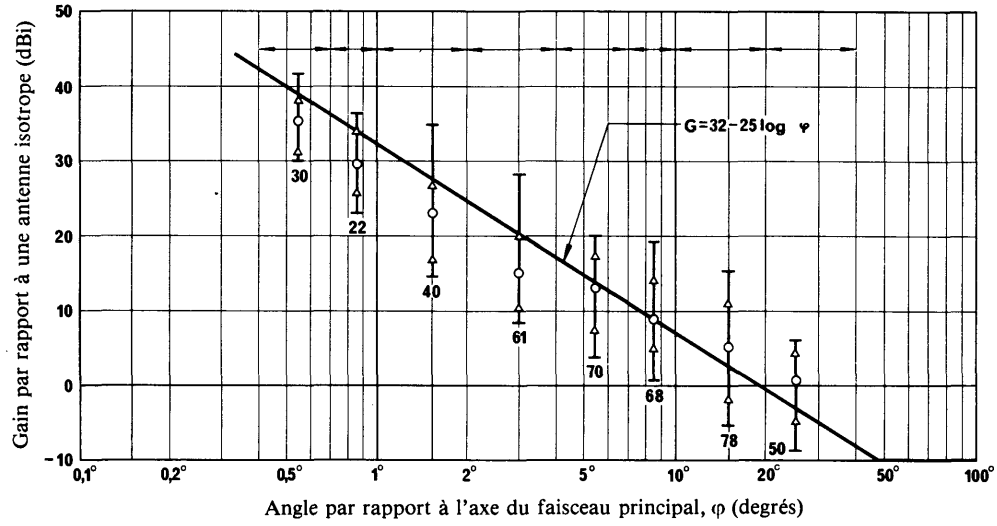


FIGURE 11 – *Exemple de distribution des crêtes des lobes latéraux*

: Ouverture angulaire (échantillonnage)
: Valeur maximale
: Valeur à 10% la plus mauvaise
: Valeur médiane
: Valeur à 10% la meilleure
: Valeur minimale
30, 22... : Nombre d'échantillons

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GRACE, S. K. et MILLER, S. N. [novembre 1966] Experimental determination of antenna sidelobe statistics. *Proc. IEEE* (Lett.), Vol. 54, **11**, 1593-1594.

SHINJI, M., TAKANO, T. et YAMADA, Y. [1976] Some statistical properties of antenna side-lobes. *Trans. Inst. Electron. and Comm. Engrs. Japan*, Vol. 59-B, **1**, 74-76.

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/308 (INTELSAT).

ANNEXE I

DIAGRAMME DE RÉFÉRENCE DE LA CAMR-79

Le diagramme de rayonnement de référence de la Fig. 12, tel qu'adopté par la CAMR-79, a été établi d'après la méthode décrite dans les Appendices 28 et 29 au Règlement des radiocommunications dont on trouvera un extrait ci-après:

«Détermination du gain d'antenne

On peut utiliser la relation $\varphi(\alpha)$ pour obtenir le gain d'antenne dans la direction de l'horizon G(dB), en fonction de l'azimut α, à l'aide du diagramme de rayonnement effectif de l'antenne de la station terrienne ou par application d'une formule donnant une bonne approximation. Par exemple, dans les cas où le rapport entre le diamètre de l'antenne et la longueur d'onde est supérieur ou égal à 100, il convient d'utiliser la formule:

$$G(\varphi) = G_{max} - 2{,}5 \times 10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \quad \text{pour } 0 < \varphi < \varphi_m \tag{39a}$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{pour } \varphi_m \leqslant \varphi < \varphi_r \tag{39b}$$

$$G(\varphi) = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{pour } \varphi_r \leqslant \varphi < 48^\circ \tag{39c}$$

$$G(\varphi) = -10 \quad \text{pour } 48^\circ \leqslant \varphi \leqslant 180^\circ \tag{39d}$$

où:

D: diamètre de l'antenne
λ: longueur d'onde
} exprimés dans la même unité

G_1: gain du premier lobe latéral $= 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D}\sqrt{G_{max} - G_1} \text{ (degrés)}$$

$$\varphi_r = 15{,}85\left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0{,}6} \text{ (degrés)}$$

Pour les antennes dont le rapport $\frac{D}{\lambda}$ est inférieur à 100, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser le diagramme de rayonnement de référence susmentionné et qu'on ne peut avoir recours à sa place ni à une donnée mesurée ni à un Avis pertinent du CCIR, accepté par les administrations concernées, les administrations peuvent utiliser le diagramme de référence représenté par:

$$G(\varphi) = G_{max} - 2{,}5 \times 10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \quad \text{pour } 0 < \varphi < \varphi_m \tag{40a}$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{pour } \varphi_m \leqslant \varphi < 100\frac{\lambda}{D} \tag{40b}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{pour } 100\frac{\lambda}{D} \leqslant \varphi < 48^\circ \tag{40c}$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{pour } 48^\circ \leqslant \varphi \leqslant 180^\circ \tag{40d}$$

où:

D: diamètre de l'antenne
λ: longueur d'onde
} exprimés dans la même unité

G_1 = gain du premier lobe latéral $= 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D}\sqrt{G_{max} - G_1} \text{ (degrés)}$$

Les diagrammes ci-dessus peuvent être modifiés selon le cas pour obtenir une meilleure représentation du diagramme de rayonnement réel.

Dans les cas où $\frac{D}{\lambda}$ n'est pas donné, il peut être estimé à partir de l'expression $20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{max} - 7{,}7$, dans laquelle G_{max} est, en dB, le gain du lobe principal de l'antenne.»

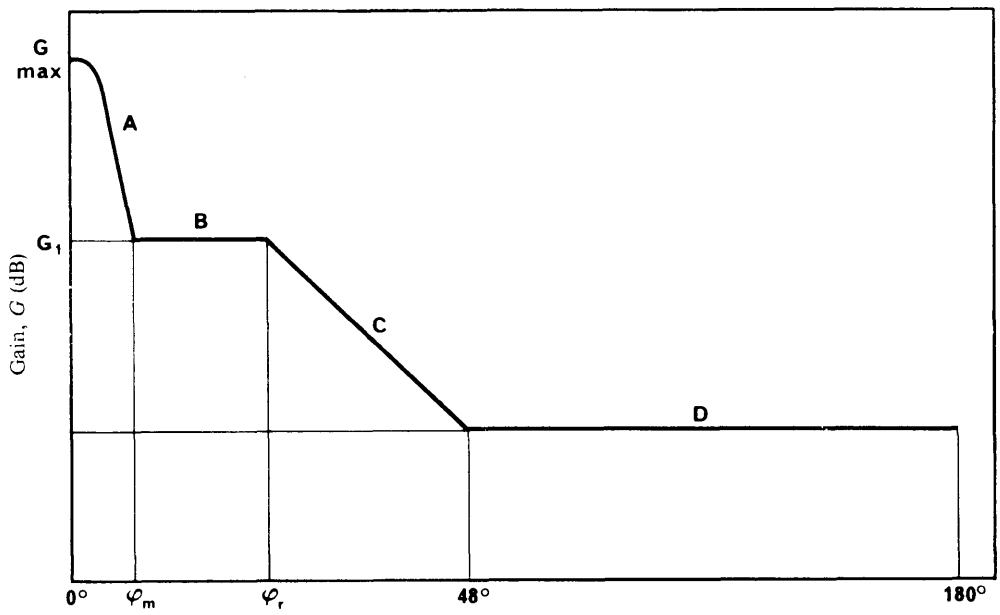


FIGURE 12 – *Diagramme de rayonnement de référence d'une antenne de station terrienne (d'après la CAMR-79)*

A: lobe principal
B: 1er lobe latéral
C: autres lobes latéraux
D: gain résiduel

Les formules ci-dessus tiennent compte de l'évaluation du diagramme de rayonnement de l'antenne à proximité de l'axe du faisceau principal, région qui ne figure pas dans le diagramme de rayonnement actuellement défini par le CCIR et des données expérimentales récentes ont montré qu'il pourrait être nécessaire de modifier la formule indiquée ci-dessus pour le gain du premier lobe latéral.

Des mesures effectuées sur plusieurs antennes Cassegrain symétriques ont montré que les niveaux relatifs dans le premier lobe latéral (en général $\leqslant -14$ dB) ne font pas apparaître de façon certaine qu'ils soient dépendants du rapport D/λ. La Fig. 13 indique les données qui ont été converties en niveaux absolus dans le premier lobe latéral, connaissant la valeur de crête du gain de chaque antenne. On peut voir que la formule ci-dessus pour G_1 sous-estime la valeur du gain dans le premier lobe latéral notamment pour les grandes antennes. On peut estimer que la formule suivante, fondée sur ces considérations, représente mieux le gain dans le premier lobe latéral:

$$G_1 = 20 \log (D/\lambda) - 7 \qquad \text{dBi.}$$

Cette formule représente une moyenne approximative des données mesurées mais il est évident que certaines caractéristiques de conception de l'antenne, comme l'efficacité de l'éclairement de l'ouverture, entraîneraient des variations dans les niveaux du premier lobe latéral, comme l'indique la dispersion des données de la Fig. 13.

Pour les angles supérieurs à 1°-1,5°, ces formules susmentionnées se ramènent à celles qu'emploie actuellement le CCIR pour les antennes de $D/\lambda > 100$.

Il est aussi recommandé que soit étudiée la compatibilité de ces formules avec la recherche d'une utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires.

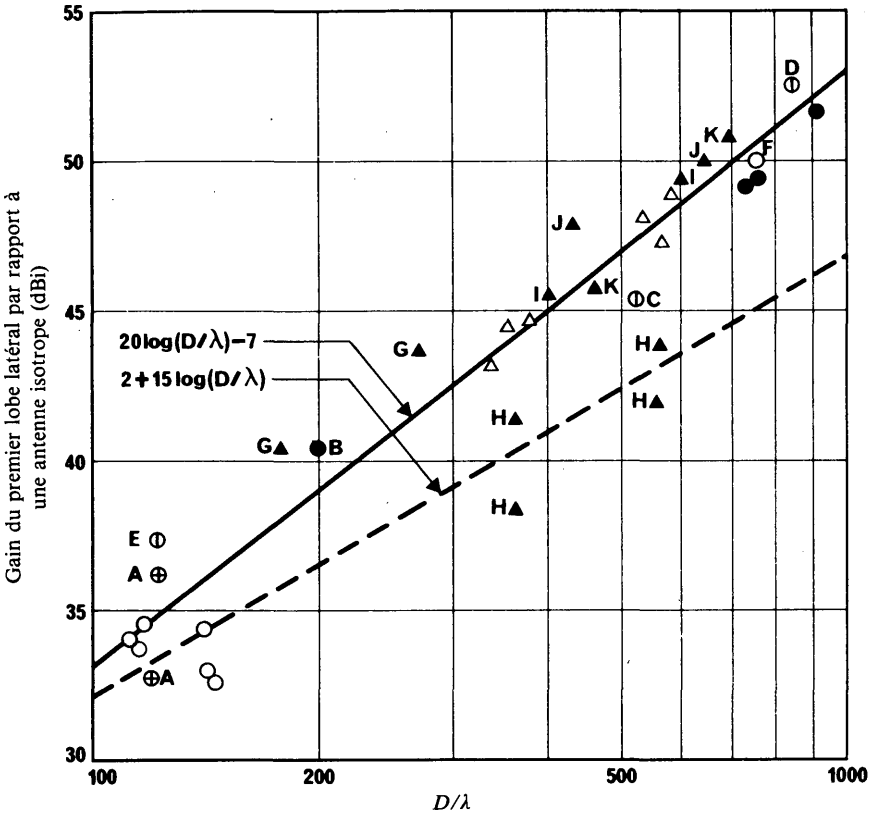


FIGURE 13 – *Valeurs absolues mesurées du niveau dans le premier lobe latéral d'antennes symétriques Cassegrain*

Royaume-Uni

○ 3 m (11/14 GHz)
△ 27,4 m (4/6 GHz)
● 19 m (11/14 GHz)

Japon

A ⊕ 10 m (4 GHz)
B ● 6 m (6 GHz)
C ⊙ 13 m (12 GHz)
D ⊙ 13 m (19,5 GHz)
E ⊙ 2 m (19,5 GHz)
F ○ 11,5 m (19,5/29,5 GHz)
G ▲ 13 m (6/4 GHz)
H ▲ 27,5 m (6/4 GHz)
I ▲ 29,6 m (6/4 GHz)
J ▲ 32 m (6/4 GHz)
K ▲ 34 m (6/4 GHz)

ANNEXE II

MÉTHODE DE TRAITEMENT STATISTIQUE DES CRÊTES DES LOBES LATÉRAUX

Les données peuvent être traitées conformément aux directives indiquées ci-après:

– On calcule la différence entre la crête de chaque lobe latéral et le niveau de référence du diagramme de rayonnement à l'angle où existe la crête. On applique ensuite une évaluation statistique, comme indiqué à la Fig. 14. La crête du lobe latéral en bordure des régions angulaires est incluse dans la région angulaire du plus petit angle.
– Les régions angulaires à utiliser seront définies commes celles qui sont représentées à la Fig. 11.
– Les données statistiques des régions angulaires bien déterminées sont alors représentées au milieu de la région angulaire respective.

Note 1. – De nouvelles études sont nécessaires pour définir les procédures appropriées à appliquer dans le cas où il n'existerait pas un nombre suffisant de crêtes des lobes latéraux (moins de 10) dans les régions angulaires spécifiées.

Note 2. – Jusqu'ici, le traitement des données a été fait en utilisant une pente de $-25 \log \varphi$. Si, à l'avenir, on adoptait une valeur différente (par exemple, pour suivre les progrès de la technique), le procédé de distribution statistique devrait être modifié en conséquence.

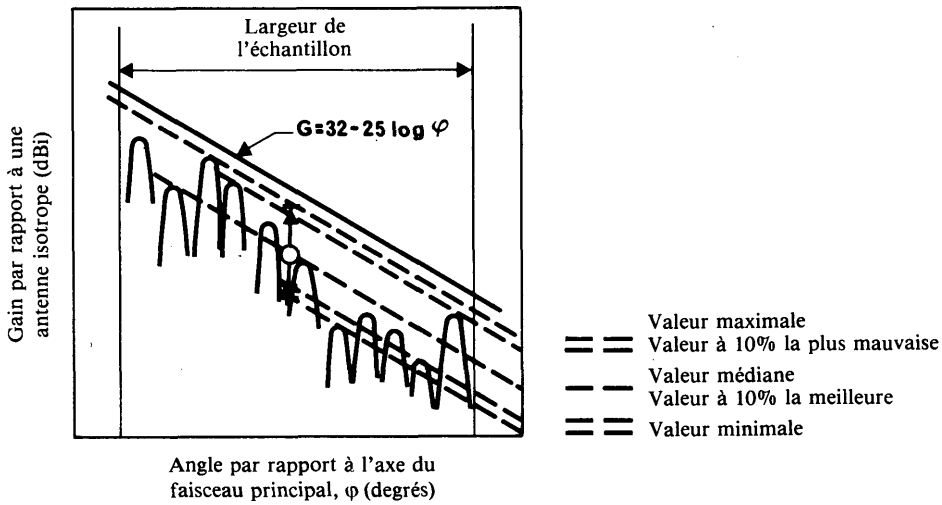


FIGURE 14 – *Expression proposée de la distribution des crêtes des lobes latéraux*

RAPPORT 390-4

ANTENNES UTILISÉES DANS LES STATIONS TERRIENNES POUR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 1/4)

(1966-1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

La plupart des antennes des stations terriennes devraient avoir les caractéristiques suivantes:

- gain élevé dans la direction des signaux utiles,
- faible gain dans la direction des signaux non désirés,
- haut rendement,
- faible température de bruit équivalente de l'ensemble de l'équipement de réception,
- possibilité de pointage sur l'intervalle de déplacement prévu pour le satellite,
- pointage continu vers le satellite, avec la précision requise,
- variation minimale des caractéristiques de fonctionnement en fonction des conditions météorologiques locales et du vent,
- variation minimale de l'éclairement du satellite par la station terrienne,
- haut niveau de discrimination entre signaux à polarisations orthogonales.

Pour certaines applications, il peut y avoir avantage à utiliser des antennes à plusieurs faisceaux et/ou à plusieurs bandes.

2. Particularités mécaniques et structurelles

2.1 *Structure des réflecteurs et de leurs supports*

L'armature dorsale doit être conçue de telle sorte que la forme, la position relative et l'attitude relative des différentes surfaces réfléchissantes puissent être maintenues avec une grande précision en dépit des variations de l'angle de site, de la vitesse du vent, de la température ambiante, du givrage et de la chaleur solaire.

2.2 *Précision de la surface des réflecteurs*

La forme des surfaces réfléchissantes doit être établie avec précision et se conserver avec précision dans toutes les conditions d'exploitation, de manière à éviter toute perte de gain et l'augmentation correspondante des niveaux des lobes latéraux. La formule suivante, extraite de [Ruze, 1966], permet d'estimer cette perte avec une marge de sécurité:

$$\text{perte de gain} = 0{,}00761\ e^2 f^2 \qquad \text{dB} \tag{1}$$

où

e: erreur quadratique moyenne sur la surface en mm;

f: fréquence en GHz.

Par exemple, à 11 GHz, une erreur de 1 mm seulement diminue le gain de pas moins de 1 dB.

A 4/6 GHz, des erreurs de l'ordre de 1 mm (valeur quadratique moyenne) dans la forme du réflecteur principal, correlées sur des distances d'environ 1,5 m, apportent une contribution importante aux niveaux de rayonnement des lobes latéraux, jusqu'à environ 2° par rapport à l'axe du faisceau principal; des erreurs de 0,5 mm (valeur quadratique moyenne) dans les divers panneaux du réflecteur apportent une contribution significative aux niveaux de rayonnement des lobes latéraux compris entre 2° et 10° par rapport à l'axe du faisceau principal. Une plus grande précision dans la forme des panneaux peut, par conséquent, entraîner une réduction appréciable du niveau global de rayonnement dans les lobes latéraux, selon la contribution fournie par d'autres sources.

2.3 *Spécifications du pointage de l'antenne et de la poursuite*

Pour de nombreux systèmes, la perte de signal due à un pointage défectueux doit être maintenue inférieure à quelques dixièmes de décibel. Dans le cas d'une antenne d'un diamètre de 30 m fonctionnant à 4 GHz, cette condition impose une précision de pointage de 0,01° environ. On peut y arriver grâce à la poursuite automatique d'un signal repère ou au moyen d'un programme de pointage sur ordinateur.

La correction ou la poursuite automatiques peuvent avoir lieu non seulement au moyen des signaux d'une balise de satellite, mais aussi au moyen de signaux de travail à large bande. Il convient, pour définir la précision de pointage d'une antenne pourvue d'un système de poursuite automatique, de se fonder non seulement sur l'écart angulaire entre la direction des équisignaux et celle du satellite, mais aussi sur la diminution de gain, par rapport au gain maximal, dans la direction du satellite.

Pour des antennes de petit diamètre associées à des satellites géostationnaires, on pourrait se contenter d'un ajustement manuel du pointage à des intervalles de temps assez longs.

Si la position du satellite est maintenue dans des limites angulaires étroites, on peut réaliser une économie en limitant l'angle de rotation de l'antenne. Une antenne à monture polaire alimentée par des réflecteurs pourrait constituer l'une des possibilités d'antenne à orientabilité restreinte. Il faut, néanmoins, bien voir qu'une restriction d'orientabilité peut avoir des conséquences défavorables sur certaines caractéristiques de fonctionnement de la station terrienne, par exemple en ce qui concerne la maintenance et les mesures utilisant des radiosources stellaires.

Il convient de noter que la possibilité d'utiliser des antennes de station terrienne de petit diamètre sans dispositif de poursuite, et donc de prix modique et d'exploitation simple, dépend en grande partie de l'inclinaison de l'orbite du satellite géostationnaire et de l'emplacement géographique de la station terrienne par rapport à la projection de la position du satellite sur la surface de la Terre. Sur la base des études effectuées en Italie [CCIR, 1978-82], on a conclu qu'une différence de longitude entre la station de Terre et la projection de la position du satellite sur la surface de la Terre pouvait réduire de façon significative la nécessité de poursuite angulaire. Par exemple, si cette différence de longitude est de 50°, il sera possible d'augmenter le diamètre de l'antenne d'environ 20% pour une station terrienne située à 30° de latitude. On a conclu en outre que dans le cas le plus défavorable d'une station terrienne située sur le même méridien que la projection du satellite (cas dans lequel la latitude de la station terrienne n'a pas d'influence importante:

- pour une diminution de 1,0 dB du gain maximal admissible et en admettant une inclinaison de l'orbite de 0,1°, le gain d'antenne de la station terrienne ne doit pas dépasser 52 dB (ce qui correspond à un diamètre d'environ 8 m à 6 GHz, 3,5 m à 14 GHz et 1,6 m à 30 GHz) si l'on veut éviter d'utiliser un dispositif de poursuite;
- pour une diminution de 0,5 dB du gain maximal admissible et en admettant encore une inclinaison de l'orbite de 0,1°, le gain d'antenne ne doit pas dépasser 48 dB (ce qui correspond à un diamètre d'environ 5 m à 6 GHz, 2,2 m à 14 GHz et 1,0 m à 30 GHz).

2.4 *Protection contre les intempéries*

Lors de l'étude d'une antenne destinée à fonctionner dans une région sujette au gel, il faut aussi tenir compte de la possibilité de formation de givre sur les surfaces de l'antenne et des effets d'hydrométéores gelés tels que la neige sèche ou fondante et la pluie givrante. D'autres conditions relatives à ces phénomènes sont les suivantes:

- les surfaces des réflecteurs et les parties critiques de l'armature dorsale doivent pouvoir être chauffées pour assurer un bon fonctionnement pendant une chute de neige sèche ou fondante ou de pluie givrante;
- l'antenne doit être conçue de manière à résister à des sollicitations conjuguées extrêmes de vent et de givre.

L'emploi d'un radôme pour protéger une antenne orientable contre les intempéries présente le grave inconvénient de dégrader la qualité de fonctionnement du système; il n'est plus estimé nécessaire.

La pluie qui tombe sur les surfaces des réflecteurs des antennes de type Cassegrain provoque une déformation des diagrammes de rayonnement de ces antennes. Il peut y avoir une variation de la direction du lobe principal et du minimum de faisceau de poursuite, mais ces effets peuvent être négligés dans la pratique. Les effets les plus importants sont la dégradation du gain et l'augmentation du minimum du lobe de poursuite; ces effets peuvent être très marqués aux fréquences supérieures à 10 GHz [Marinčić et Popović, 1975].

3. Caractéristiques de fonctionnement des antennes de station terrienne

3.1 *Types d'antenne*

Les antennes équipant des stations terriennes sont actuellement de plusieurs types: réflecteurs paraboliques avec alimentation du type Cassegrain, Gregory ou au foyer et réflecteurs en cornet.

On utilise le plus souvent des réflecteurs paraboliques avec alimentation du type Cassegrain, entre lesquels on peut distinguer ceux à champ proche et à source ponctuelle, les uns et les autres conçus pour un haut rendement. On pense voir bientôt entrer en service des dispositifs d'alimentation à champ proche à plusieurs réflecteurs.

3.2 *Gain dans le lobe principal*

Le gain maximal réalisable dépend en grande partie de l'uniformité d'éclairement de l'ouverture de l'antenne et de la précision de la surface du réflecteur. On peut obtenir des rendements plus élevés en donnant une forme appropriée aux réflecteurs principaux et aux réflecteurs secondaires, de manière qu'ils ne soient plus, respectivement, exactement des paraboloïdes ou des hyperboloïdes. Cette mise en forme permet d'obtenir un éclairement quasi uniforme tout en conservant un front d'onde plan.

3.3 *Niveau des lobes latéraux et arrière*

Les lobes latéraux des antennes de station terrienne ont une influence directe sur le niveau de brouillage entre les réseaux. Cela est particulièrement important pour les lobes latéraux d'antenne qui ne s'écartent que de quelques degrés de l'orbite des satellites géostationnaires. Il convient donc de s'efforcer de mettre au point des antennes de station terrienne ayant dans les lobes latéraux des gains d'enveloppe les plus faibles possibles.

Les lobes latéraux et arrière d'une antenne dépendent avant tout de la quantité d'énergie qui déborde des réflecteurs primaire et secondaire, de la quantité d'énergie interceptée ou réfléchie par diverses parties de la structure et du diagramme d'alimentation primaire, facteurs sur lesquels des renseignements détaillés sont donnés dans l'Annexe I.

Dans le cas d'une petite antenne ($D/\lambda < 100$), le niveau dans les lobes latéraux, dans la zone angulaire proche de l'axe principal, est généralement plus élevé que dans le cas d'une grande antenne. Une antenne à deux réflecteurs avec alimentation excentrée, par exemple une antenne grégorienne ou une antenne Cassegrain, présente cependant de meilleures caractéristiques de lobes latéraux que les antennes classiques à réflecteur symétrique en ce qui concerne les petits angles polaires, c'est-à-dire ceux qui posent des problèmes dans les systèmes utilisant des satellites très rapprochés.

Les diagrammes de rayonnement des antennes existantes de station terrienne sont généralement conformes au diagramme de rayonnement de référence exprimé par la formule:

$$G = 32 - 25 \log \varphi$$

qui figure dans l'Avis 465. La confirmation expérimentale des meilleures propriétés des antennes avec alimentation excentrée est donnée dans l'Annexe I où sont décrites un certain nombre d'antennes de ce type. Ces données expérimentales montrent que les antennes de station terrienne conçues pour avoir des gains peu élevés dans les lobes latéraux pourraient répondre à un objectif de conception plus astreignant que celui visé par le diagramme de rayonnement de référence actuel.

De nouvelles données sont nécessaires pour établir un objectif de conception approprié. Les administrations sont donc invitées à présenter des diagrammes de rayonnement mesurés d'antennes de station terrienne, comme le demande le Rapport 391. Il est particulièrement utile de recueillir des données sur les antennes couvrant une large gamme de valeurs de D/λ et de fréquences, de façon à pouvoir définir les diverses applications de l'objectif de conception.

3.4 *Température de bruit des antennes*

Les lobes latéraux et arrière d'une antenne, ainsi que son lobe principal, contribuent à sa température de bruit. Dans la plupart des applications, il suffit d'admettre qu'aux angles d'élévation inférieurs à $-10°$ les lobes latéraux «voient» le sol sous une température de 290 K. Entre $-10°$ et 0°, on peut admettre que cette température est de 150 K; entre 0° et 10°: 50 K et entre 10° et 90°: 10 K. La puissance reçue dans les lobes latéraux peut s'exprimer en pourcentage de la puissance totale; elle est répartie entre les quatre zones angulaires définies ci-dessus.

Les contributions à la température du bruit dues à des sources extraterrestres sont examinées de façon assez détaillée dans l'Annexe II au présent Rapport.

Dans un cas typique, la température de bruit d'une grande antenne du type Cassegrain destinée à fonctionner à 4 GHz sous un angle de site de 5° pourrait se décomposer comme suit:

Faisceau principal	25 K
Lobes latéraux voisins	2 K
Diffraction sur le réflecteur secondaire	8 K
Diffraction sur le réflecteur principal	5 K
Total partiel	40 K

Les préamplificateurs à refroidissement cryogénique ont généralement une température de bruit de 20 K environ, ce qui porte à 70 K environ la température de bruit totale du système, y compris les affaiblissements dus aux guides d'ondes. Si l'on devait utiliser un préamplificateur à refroidissement non cryogénique (préamplificateur paramétrique non refroidi), la température de bruit du système pourrait être de l'ordre de 80 à 120 K.

3.5 *Facteur de qualité du système*

Une indication très utile sur le fonctionnement d'une station terrienne est le facteur de qualité, ainsi défini:

$$G/T = 10 \log \left[\frac{\text{gain en puissance de l'antenne}}{\text{température de bruit du système (K)}} \right] \quad (2)$$

Il est commode de rapporter le gain en puissance de l'antenne et la température de bruit du système à l'entrée du récepteur à faible bruit, pourvu que le bruit provenant des étages du récepteur suivant le point de référence soit compris. Ainsi, dans le cas d'une antenne ayant un gain de 58,8 dB avec une température de bruit de système de 65 K, le facteur de qualité G/T serait de 40,7 dB(K^{-1}).

On peut mesurer directement le facteur de qualité d'une antenne en utilisant comme source de référence une radiosource stellaire. L'Annexe III décrit la méthode dans ses grandes lignes.

Une autre solution consiste à déterminer le facteur de qualité d'une antenne de station terrienne en mesurant séparément la température de bruit du système et le gain d'antenne, cette dernière grandeur étant mesurée selon l'une des méthodes habituelles.

3.6 *Antennes multibande*

Si l'on veut que l'antenne puisse fonctionner sur une large gamme de fréquences sans que ses caractéristiques soient sensiblement dégradées, il faut tenir compte de facteurs supplémentaires. Dans ce cas, les antennes paraboliques avec alimentation au foyer ne conviennent pas. Les réflecteurs en cornet peuvent fonctionner sur plusieurs bandes de fréquences, mais ils soulèvent des difficultés de réalisation.

Les antennes du type Cassegrain admettent un fonctionnement multibande; il faut pour cela optimaliser le cornet d'alimentation primaire et l'ensemble réflecteur secondaire. On a conçu et réalisé une antenne de ce type pour fonctionner à 4, 6, 20 et 30 GHz [Mori, 1973]. Il s'agit d'une antenne de 12,8 m de diamètre avec dispositif d'alimentation à faisceau focalisé et dispositif de séparation des bandes logé dans le piédestal fixe de l'antenne. Son rendement à l'ouverture, compte non tenu des pertes de gain dans le dispositif de séparation des bandes, est compris entre 50 et 62%. La médiane des niveaux de crête des lobes latéraux est inférieure à $32 - 25 \log \varphi$ (dB) (φ étant l'angle que fait l'axe du faisceau principal avec la direction considérée) et la température de bruit est de 48 K ou 68 K, respectivement à 4 ou 18 GHz, pour un angle de site de 5°.

3.7 *Discrimination de polarisation*

Dans beaucoup de situations, les antennes de stations terriennes peuvent être appelées à avoir un haut niveau de discrimination entre signaux à polarisation orthogonale de l'ordre de 30 à 35 dB; cette discrimination est examinée en détail dans le projet de Rapport 555.

4. Dangers des rayonnements que peuvent présenter les systèmes d'antenne des stations terriennes

Les puissances d'émission requises dans les stations terriennes peuvent être de nature à produire des puissances surfaciques élevées dans certaines zones situées dans les champs de rayonnement proche et éloigné du système, ce qui peut être dangereux pour les êtres humains. L'Annexe IV expose une méthode permettant de prévoir les puissances surfaciques d'une antenne de 30 m; cette méthode permettra de déterminer si le seuil de sécurité des rayonnements sera dépassé ou non.

5. Relevé des diagrammes d'antenne de stations terriennes

La relevé des diagrammes d'antenne est généralement établi à l'aide d'une source de signaux éloignée qui peut être située au sol (axe de visée) ou dans un satellite géostationnaire. Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients mais il convient de noter que les premières sont parfois peu aisées, coûteuses à mettre en œuvre et difficiles à utiliser à cause des caractéristiques du terrain où est installée l'antenne. Le relevé à l'aide d'un satellite fournit des données plus réalistes puisque l'antenne se trouve à l'angle de site de travail. De plus, les diagrammes correspondant aux niveaux des lobes éloignés du faisceau principal peuvent être plus facilement déterminés.

Afin d'obtenir la sensibilité de réception adéquate pour le relevé des lobes latéraux éloignés du faisceau principal, compte tenu des possibilités des émetteurs de satellite actuels, il faut employer un récepteur à bande étroite avec une technique de balayage en fréquence. C'est ainsi que l'Administration de la France a utilisé une largeur de bande de réception de 10 Hz, associée à une vitesse de balayage de 10 Hz/s. L'étendue du balayage doit être supérieure à la dérive nominale prévue de l'émetteur du satellite. Le système a permis de mesurer des niveaux aussi petits que 0 dBi dans les lobes latéraux, à l'aide d'un satellite géostationnaire ayant une p.i.r.e. de 10 dBW.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MARINČIĆ, A. et POPOVIĆ, B. [1975] Radiation diagrams of parabolic-cylinder Cassegrain antenna covered with a water film. COST/TELECOM 2/TD 29/75, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, Yougoslavie (République socialiste fédérative de).

MORI, Y. [avril 1973] Experimental earth station for a domestic satellite system. *Japan Telecomm. Rev.*, 15.2, 101-110.

RUZE, J. [avril 1966] Antenna tolerance – a review. *Proc. IEEE*, Vol. 54, **4**, 633-640.

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/341 (Italie).

ANNEXE I

CARACTÉRISTIQUES DE RAYONNEMENT DES ANTENNES DE STATION TERRIENNE EN DEHORS DU LOBE PRINCIPAL

Dans l'étude et la construction des antennes de station terrienne, il faut, si l'on veut assurer l'utilisation la plus efficace de l'orbite des satellites géostationnaires, connaître les facteurs qui contribuent à engendrer le rayonnement des lobes latéraux et disposer de méthodes permettant de le réduire par des techniques spéciales ou par l'emploi de différents types d'antennes.

1. Facteurs influençant les niveaux des lobes latéraux

1.1 *Influence de l'illumination du réflecteur*

On peut appliquer diverses techniques pour obtenir un faible niveau de lobes latéraux, par exemple la technique d'illumination dégressive.

Lors du choix des fonctions d'illumination, il faut trouver un compromis entre la réduction des lobes latéraux et l'efficacité de l'antenne. Si l'on désire, par exemple, réduire le rayonnement des lobes latéraux au voisinage du faisceau principal, il faut choisir une fonction d'illumination qui n'excite pratiquement pas les bords de la source et du réflecteur diminuant ainsi l'efficacité de l'antenne. Le but recherché est une illumination aussi symétrique de révolution que possible, afin que les illuminations des plans E et H du réflecteur soient égales. On peut obtenir une telle illumination symétrique à l'aide d'une source à deux modes et/ou d'une source à mode hybride.

1.2 *Influence du débordement*

Pour illuminer le réflecteur secondaire d'une antenne Cassegrain symétrique, il faut une source primaire qui rayonne dans la direction du faisceau principal de l'antenne. Il en résulte des rayonnements parasites vers l'avant, en raison du débordement du lobe principal de la source primaire à l'extérieur du réflecteur secondaire et des lobes latéraux de la source primaire même.

Dans le cas des antennes de grandes dimensions, le débordement du réflecteur secondaire a une influence beaucoup moins importante sur les lobes latéraux de l'antenne que les autres phénomènes pour les angles jusqu'à environ 5° de l'axe du lobe principal (voir la Fig. 1); il joue, en revanche, un rôle beaucoup plus significatif pour des angles supérieurs. Une méthode permettant de réduire cet effet consiste à s'assurer que le réflecteur secondaire intercepte le lobe principal de la source primaire au moins jusqu'au point -20 dB.

Pour certaines grandes antennes, les lobes latéraux de la source primaire jouent un rôle plus important que les lobes latéraux de l'antenne aux angles compris entre 20° et 80° par rapport au lobe principal. On ne peut éviter cette contribution au diagramme de rayonnement des lobes latéraux de l'antenne qu'en utilisant des sources primaires conçues pour avoir des niveaux de lobes latéraux faibles.

On peut écarter du faisceau principal le rayonnement de débordement, en utilisant une antenne du type à source d'illumination décentrée. Une telle source permet également d'utiliser un réflecteur secondaire plus grand, qui interceptera une proportion très élevée du rayonnement du lobe principal de la source primaire, sans qu'il en résulte un blocage important de l'ouverture.

1.3 *Influence du blocage et de la diffraction*

La source primaire ou le réflecteur secondaire placé dans l'ouverture d'une antenne à réflecteur, et ses supports, ont une influence considérable sur le diagramme de rayonnement des lobes latéraux de l'antenne: en effet, en bloquant l'ouverture de l'antenne, ils modifient le diagramme d'illumination de l'ouverture et, partant, le diagramme de rayonnement [Boithias et Béhé, 1971; Kreutel, 1976]. On peut diminuer les effets de ce blocage en réduisant la superficie bloquée de l'ouverture, ou en utilisant des types d'antenne ne comportant pratiquement pas d'éléments de blocage, tels que des cornets ou des réflecteurs décentrés [Mizugutch et autres, 1976].

Il arrive que les bords du réflecteur secondaire et du réflecteur principal causent une diffraction de l'énergie aux hyperfréquences, l'ampleur de ce phénomène dépendant du niveau d'illumination des bords de ces réflecteurs. On peut réduire cette diffraction en fixant un absorbant de micro-ondes au pourtour du réflecteur secondaire et du réflecteur principal, moyennant une légère augmentation de la température de bruit de l'antenne.

1.4 *Influence de la diffusion*

Une onde plane, qui prend naissance dans le réflecteur principal d'une antenne symétrique, excite la source primaire ou le réflecteur secondaire et ses supports, qui produisent un rayonnement. Si les supports sont fixés à l'intérieur du réflecteur principal, une onde sphérique additionnelle, prenant naissance au foyer du réflecteur principal, est diffusée vers les supports. Ces rayonnements diffusés peuvent modifier le diagramme de rayonnement des lobes latéraux pour des angles déterminés par la position et l'orientation des supports. On peut réduire cette diffusion en fixant un absorbant de micro-ondes aux supports, mais cela augmentera également la température de bruit de l'antenne. Un dispositif de diffusion des micro-ondes installé sur les supports du réflecteur permettra également de réduire la diffusion sans augmenter la température de bruit de l'antenne.

1.5 *Influence de la distorsion de phase sur le diagramme du système d'alimentation*

Une distorsion de phase affectant l'intensité du rayonnement dans l'ouverture d'un réflecteur parabolique entraîne un élargissement du lobe principal et une augmentation des niveaux dans les lobes latéraux. Cette distorsion de phase peut se produire si le système d'alimentation ne présente pas un centre de phase ponctuel, c'est-à-dire si l'on n'a pas un front de phase sphérique.

Dans les antennes Cassegrain, on peut compenser la distorsion de phase qui prend naissance dans le cornet d'alimentation en changeant la forme du réflecteur principal. Il convient de noter qu'une distorsion de phase de ce type peut donner lieu à une déviation du faisceau dans les systèmes à plusieurs systèmes d'alimentation du réflecteur.

1.6 *Influence des tolérances de surface du réflecteur principal*

Les erreurs de surface (construction, vent, différence de température et gravité) entraînent une élévation du niveau dans les lobes latéraux.

La déformation due au poids des parties supérieure et inférieure du réflecteur principal provoque une erreur de phase cubique dans le plan de l'ouverture. Cette erreur produit une asymétrie des lobes latéraux dans le plan vertical.

1.7 *Polarisation*

Certains des facteurs mentionnés ci-dessus, et qui contribuent au niveau des lobes latéraux dans le plan de polarisation principal, peuvent également augmenter le niveau des lobes latéraux dans d'autres plans de polarisation dans les lobes latéraux. On trouvera dans le Rapport 555 des renseignements plus détaillés sur la polarisation dans les lobes latéraux.

2. Contributions quantitatives des composantes principales

Les niveaux de rayonnement des lobes latéraux pour un angle donné, dans le cas d'une grande antenne du type Cassegrain, représentent la somme des composantes du champ rayonnées simultanément par différentes parties du système d'antenne. On trouvera à la Fig. 1 des exemples de niveaux de ces composantes.

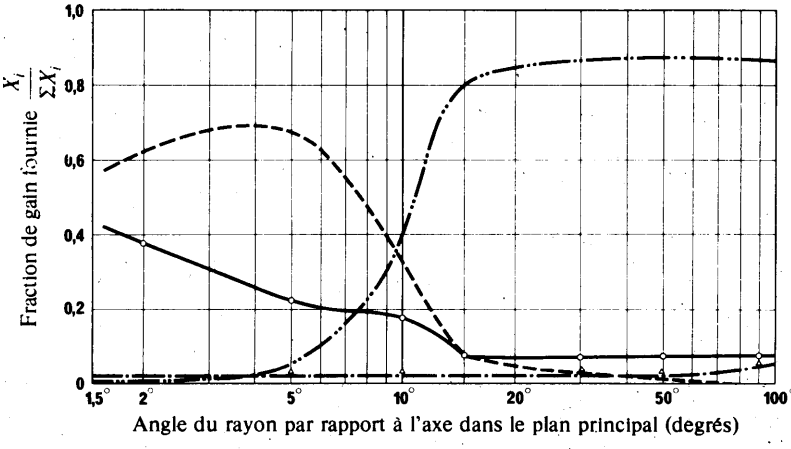


FIGURE 1 — *Contribution relative des différentes parties d'une antenne Cassegrain de 600 λ à l'enveloppe du gain (grande ouverture angulaire)*

——— Gain dû à l'ouverture annulaire du réflecteur principal

—·— Gain dû aux membrures dans le plan principal

—··— Gain dû au dispositif d'alimentation (y compris la diffraction autour du réflecteur secondaire)

— — — Gain dû aux membrures dans un plan normal au plan principal

$$G = 20 \log (X_1 + X_2 + \ldots + X_n) \text{ dB}$$

Terme relatif au rayonnement du dispositif d'alimentation

Terme relatif au rayonnement du réflecteur principal

3. Comparaison des différents types d'antennes de stations terriennes

3.1 *Comparaison entre différents types d'antennes*

Pour comparer les caractéristiques relatives des lobes latéraux, on a mesuré aux Etats-Unis d'Amérique les diagrammes de rayonnement de diverses antennes en service, des types ci-après:

- antenne Cassegrain,
- antenne à foyer principal,
- antenne à réflecteur excentrique,
- antenne cornet-réflecteur,
- antenne Cassegrain avec une source cornet.

Aux fins de comparaison, la Fig. 2 indique les diagrammes de rayonnement mesurés des différentes antennes énumérées ci-dessus. L'enveloppe de ces diagrammes peut être décrite par une expression générale de la forme:

$$\frac{G(\varphi)}{G} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^n} \quad \text{pour} \quad 2 < \frac{\varphi}{\varphi_0} < 100 \tag{3}$$

où G représente le gain dans le lobe de rayonnement principal de l'antenne. Pour $n = 2{,}5$, la formule donne le même taux de diminution du niveau des lobes latéraux en fonction de φ, angle par rapport à l'axe du lobe de rayonnement principal, que donnerait la formule du diagramme de rayonnement de référence, $G(\varphi) = 32 - 25 \log \varphi$. Les diagrammes sont normalisés par rapport à la demi-ouverture du lobe principal, soit φ/φ_0, φ étant l'angle par rapport à l'axe du lobe de rayonnement principal et $2\varphi_0$ l'ouverture à demi-puissance.

L'amélioration procurée par le réflecteur décalé et par le réflecteur en cornet s'explique essentiellement par le fait qu'il n'y a pratiquement pas d'effet de blocage avec ces antennes et que le rayonnement direct du dispositif d'alimentation est plus faible dans le secteur dirigé vers l'avant, par rapport à ce qu'il est dans une antenne du type Cassegrain.

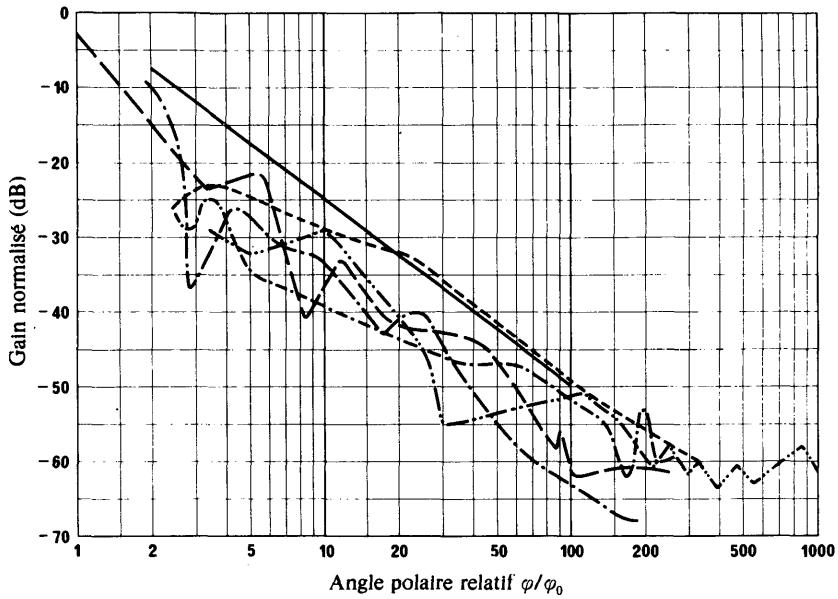


FIGURE 2 — *Diagrammes de rayonnement mesurés de différents types d'antennes*

——— $G(\varphi) = \left[1 + \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{2,5}\right]^{-1}$

– – – – – Rayonnement d'antennes Cassegrain $D = 600\,\lambda$

—·—·— Rayonnement d'antennes à dispositifs d'alimentation au foyer $D = 600\,\lambda$

—·—·—·— Rayonnement d'antennes à dispositifs d'alimentation excentré $D = 100\,\lambda$

—·— Rayonnement de réflecteurs à cornet conique $D = 250\,\lambda$

——— Rayonnement de réflecteurs à cornet Cassegrain $D = 128\,\lambda$ (Casshorn)

3.2 *Caractéristiques des lobes latéraux des antennes à illumination décentrée*

Si une réduction des niveaux des lobes latéraux est requise dans les directions voisines ou éloignées de l'axe de l'antenne, il est préférable d'employer une antenne à source d'illumination décentrée utilisant comme source primaire un cornet à diélectrique ou un cornet cannelé. Ainsi qu'il est exposé au § 1.3, il n'existe pas de blocage d'ouverture dans ces antennes. L'utilisation d'une source primaire à faible niveau de lobes latéraux entraîne également de faibles niveaux des lobes latéraux dans les directions voisines ou éloignées de l'axe de l'antenne. La Fig. 3a représente l'enveloppe mesurée des lobes latéraux d'une antenne grégorienne asymétrique de $D/\lambda = 66$.

Pour réduire la diffraction et la diffusion sur les bords de l'antenne, qui produisent quelques-uns des lobes latéraux de l'antenne, on peut fixer un absorbant de micro-ondes autour de la bordure extérieure des réflecteurs et à la structure du support. La Fig. 3b représente une comparaison des formes d'enveloppe dans le cas d'une antenne grégorienne de $D/\lambda = 91$, avec et sans absorbant. Dans le cas de la Fig. 3b, on peut estimer l'augmentation de la température de bruit, ΔT, à moins de 4,4 K sous tous les angles de site. De plus, cette méthode ne conduit pas à une réduction importante du gain de l'antenne, puisque l'absorbant de micro-ondes est fixé sur une zone où le niveau d'illumination est très faible.

On a mis au point une antenne Cassegrain de 11,5 m de diamètre à alimentation excentrée, fonctionnant dans la bande des 30/20 GHz [Takano et autres, juin 1980a]; dans cette antenne, on a utilisé une technique de conformation pour le réflecteur secondaire et le réflecteur d'alimentation du guide d'ondes, tandis que le réflecteur principal est un paraboloïde de révolution [Takano et autres, 1980b]. Cette nouvelle méthode réduit au minimum le coût de fabrication. Des rendements d'ouverture allant de 69% à 76% ont été mesurés dans toute la bande des 30/20 GHz et la température de bruit aux bornes du cornet est inférieure à 18 K à 18,75 GHz avec un angle de site de 45°. Les diagrammes de rayonnement à grande ouverture sont représentés sur la Fig. 3c, d'où il ressort que les niveaux dans les lobes latéraux sont inférieurs d'environ 10 dB aux objectifs fixés dans l'Avis 465.

Des mesures effectuées sur une antenne asymétrique à l'échelle unité à optique grégorienne de 7,6 m de diamètre à 6 GHz ($D/\lambda = 100$) ont montré que, si l'on applique les principes indiqués au § 1 de la présente Annexe, on peut obtenir d'excellents résultats aux fréquences plus basses. Un diagramme type pris au centre de la bande des 6 GHz dans le plan azimutal est représenté sur la Fig. 3d.

Un procédé de synthétisation applicable à la conception des antennes à double réflecteur avec alimentation excentrée [Bjøntegaard et Pettersen, 1981] permet d'obtenir la distribution prescrite pour l'éclairement de l'ouverture, tout en maintenant la symétrie géométrique de révolution des fronts de phase. Ce procédé a été utilisé pour construire une antenne Grégory de 1,8 m de diamètre et les mesures ont confirmé qu'il était possible de fabriquer de petites antennes de stations terriennes ($D/\lambda \simeq 70$) à rendement élevé, à niveaux faibles dans les lobes latéraux (environ 10 dB au-dessous de la courbe de référence du Rapport 391) et découplage élevé entre polarisations. Le diagramme d'azimut est reproduit sur la Fig. 3e.

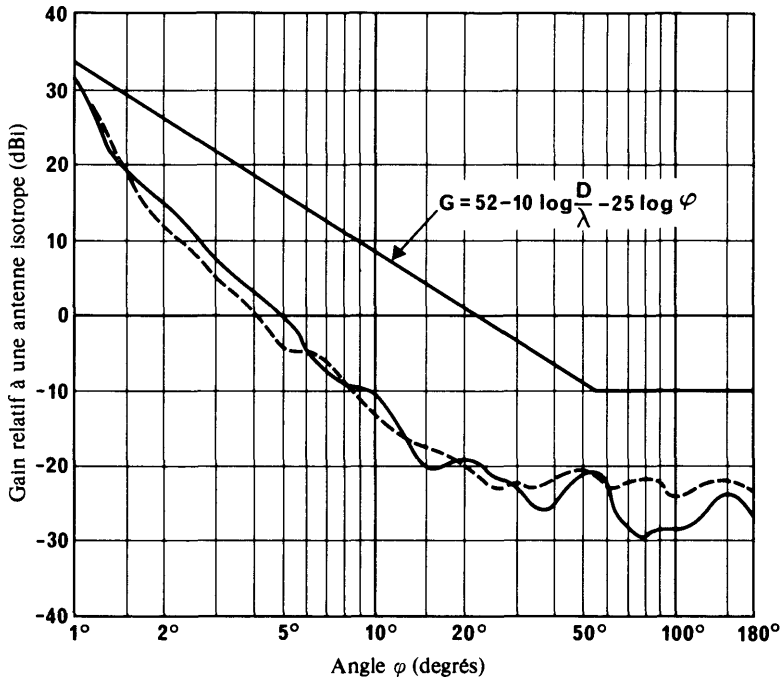


FIGURE 3a — *Diagramme de l'enveloppe de crête du rayonnement de l'antenne grégorienne à décalage sans absorbeur à micro-ondes ($D/\lambda = 66$, fréquence = 25 GHz)*

——— plan E

– – – – plan H

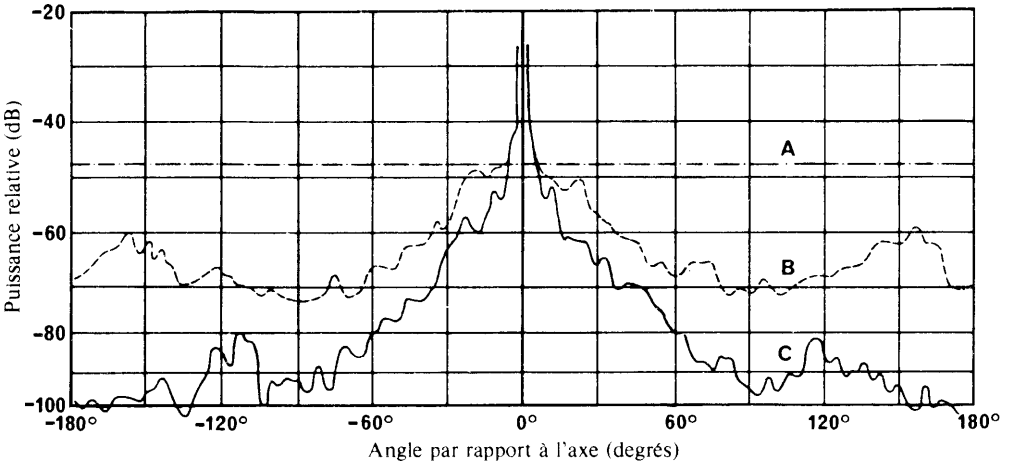


FIGURE 3b — *Diagrammes mesurés des lobes latéraux de la même antenne grégorienne à décalage que dans la Fig. 3a avec et sans absorbeur à micro-ondes (D/λ = 91, fréquence = 34 GHz)*

A : Niveau isotrope
B : Sans absorbeur à micro-ondes
C : Avec absorbeur à micro-ondes

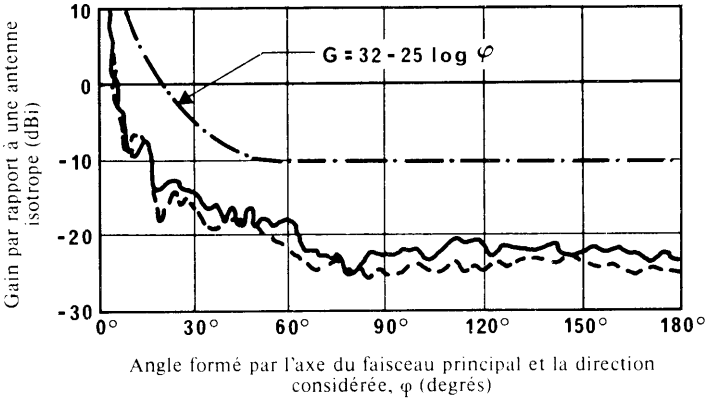


FIGURE 3c – *Enveloppe crête des diagrammes en puissance d'une antenne Cassegrain à alimentation excentrée (D = 11,5 m)*

——— f = 19,5 GHz (D/λ = 748)

— — — — f = 29,5 GHz (D/λ = 1131)

(Plan azimutal)

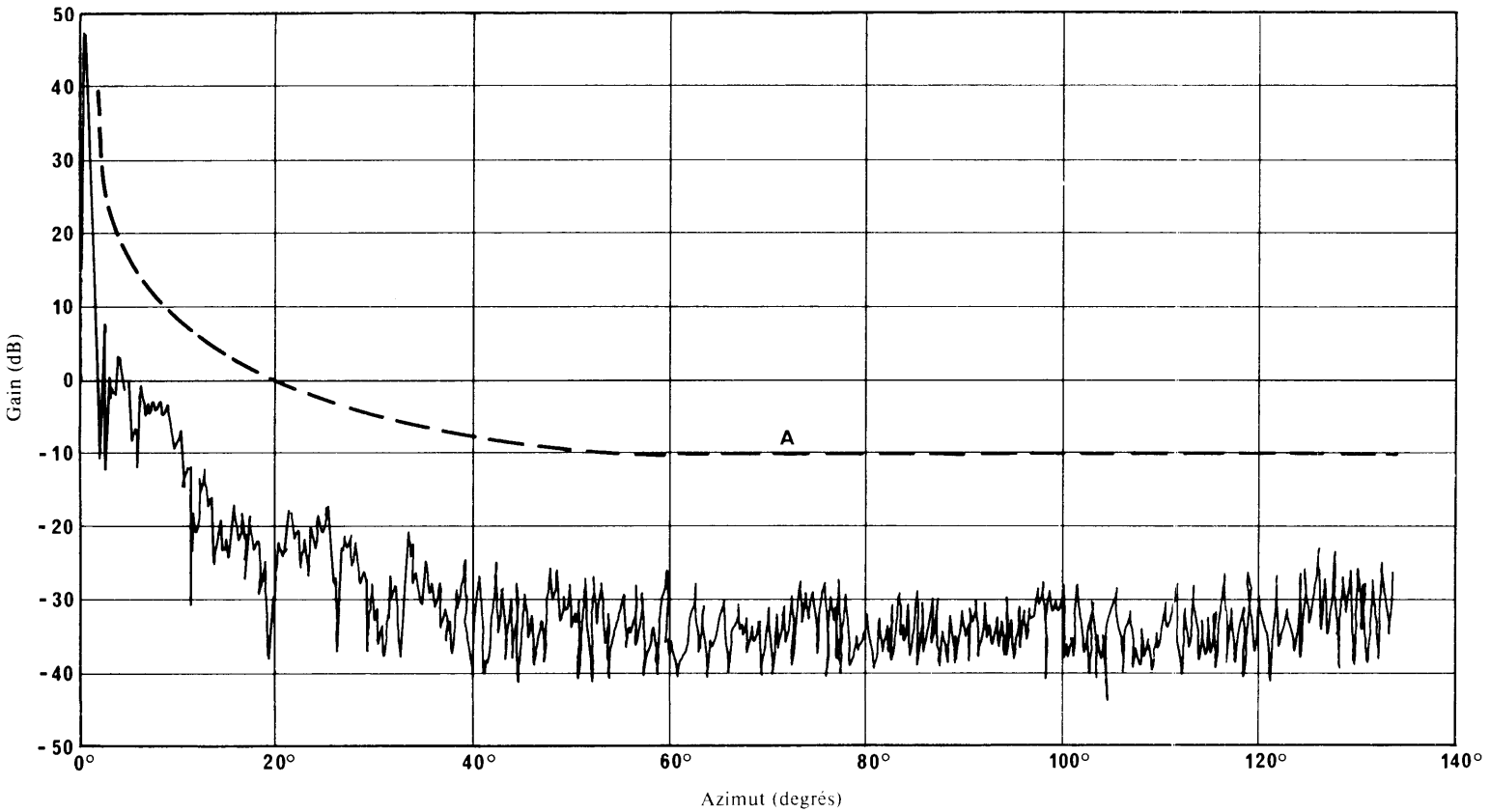


FIGURE 3d – *Enveloppe crête du diagramme en puissance d'une antenne asymétrique grégorienne (D = 7,6 m) f = 6175 MHz; D/λ = 100 (Plan azimutal)*

A : diagramme de référence de l'Avis 465

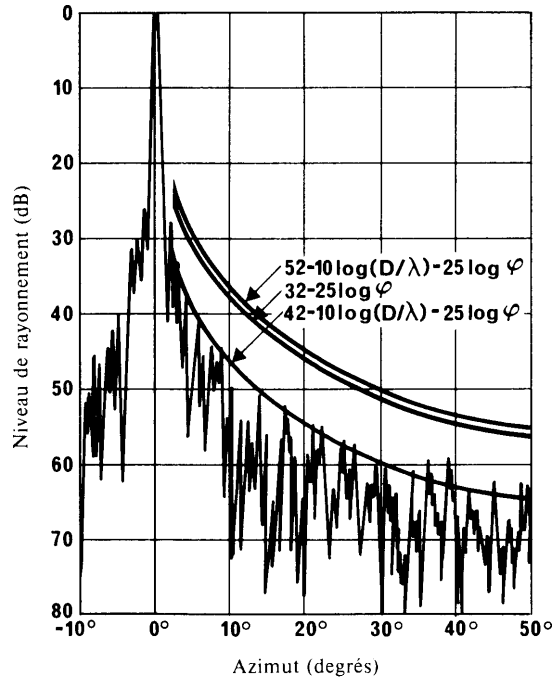


FIGURE 3e – *Diagramme d'azimut mesuré d'une antenne Gregory à alimentation excentrée modelée (f = 12 GHz, D = 1,8 m, D/λ = 72)*

4. Caractéristiques des champs de rayonnement d'antenne particulièrement intéressants

4.1 *Champs de rayonnement proches des antennes de station terrienne*

La nature des champs de rayonnement en arrière et à proximité d'une antenne de station terrienne est particulièrement intéressante quand on cherche à déterminer la possibilité de réutiliser des fréquences du secteur spatial dans des systèmes de Terre.

Les champs de ce genre ont déjà été l'objet de calculs théoriques, dont on a confirmé le bien-fondé au moyen de diagrammes de rayonnements mesurés. On a mesuré les niveaux du signal dans le secteur arrière d'une antenne du type Cassegrain dont le rapport D/λ (du diamètre à la longueur d'onde) était de l'ordre de 600. La Fig. 4 montre le gain isotrope de cette antenne, mesuré sur un arc distant de quelque 30 m de l'arrière de l'antenne. La Fig. 5 montre le gain apparent mesuré sur une ligne droite, à l'arrière de l'antenne, dans le prolongement de l'axe du lobe principal. (Ce gain apparent est déterminé à partir du champ mesuré, corrigé pour tenir compte de l'affaiblissement en espace libre; il est exprimé en dB par rapport au gain isotrope.)

Ces valeurs mesurées étaient de l'ordre de celles fournies tant par les calculs théoriques du champ proche que par les diagrammes de rayonnement en champ lointain pour les antennes en question.

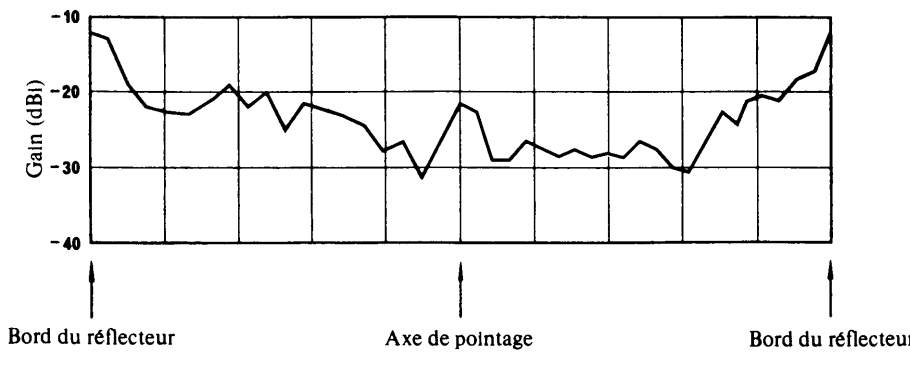
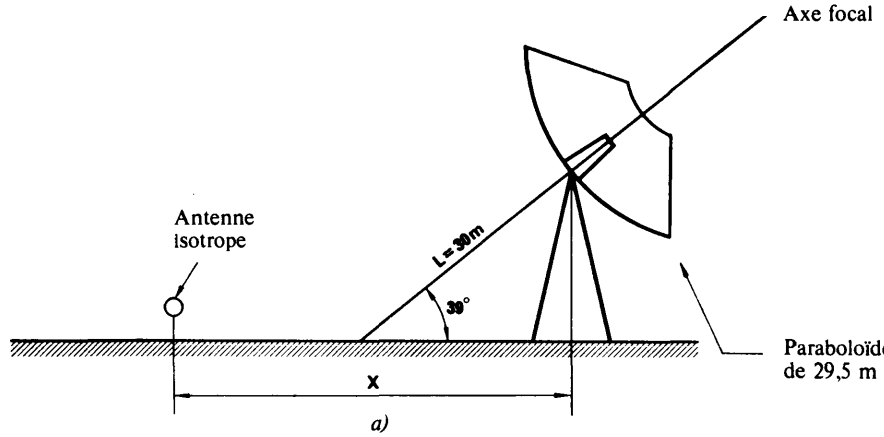
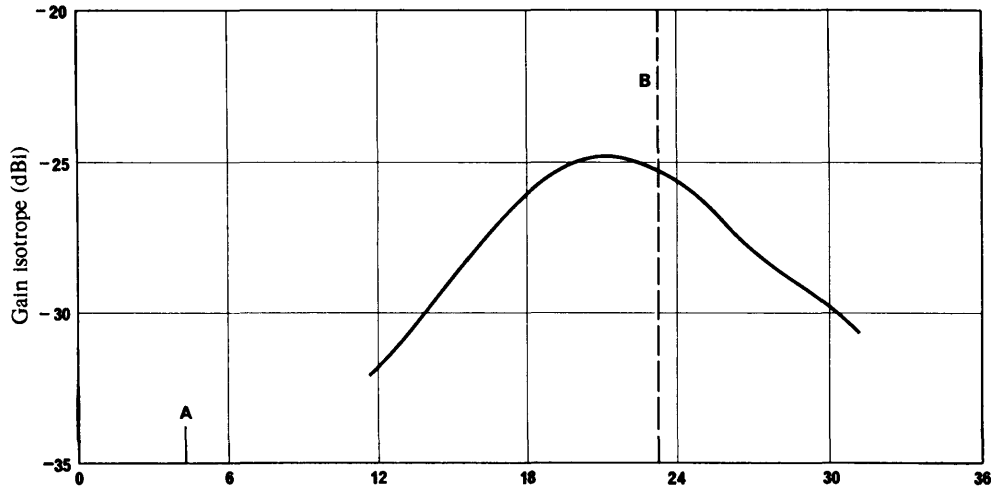


FIGURE 4 — *Mesures du niveau au sol sur un arc d'environ 30 m, derrière l'antenne*



a)



b)

FIGURE 5 — *Gain d'antenne apparent à l'arrière d'une antenne de station terrienne de 29,5 m de diamètre*

A: Base du pylône B: Point d'intersection approximatif de l'axe focal avec le sol, L = 30 m

f = 6403 MHz

4.2 *Protection des emplacements par des obstacles dans le champ proche ou dans le champ lointain*

L'emplacement de la station terrienne peut être choisi de manière que celle-ci puisse bénéficier d'un certain degré de protection contre les rayonnements indésirables en tirant parti d'obstacles situés dans le champ proche ou dans le champ lointain de l'antenne. On peut définir le facteur de protection de l'emplacement comme étant la différence, exprimée en dB, entre l'affaiblissement de propagation dû à l'obstacle et l'affaiblissement de propagation sur la même distance en l'absence d'obstacle.

Dans un cas exemplaire, on a pratiqué une excavation circulaire autour d'une antenne de 10 m de diamètre destinée à travailler avec des satellites géostationnaires occupant un arc de l'orbite. On a déterminé par des mesures l'effet de cette protection dans les bandes des 4 et 6 GHz attribuées au service fixe par satellite. La Fig. 6 indique les résultats des mesures dans ces bandes avec des satellites placés en différentes positions de l'arc d'orbite. On a constaté que, avec une antenne protégée, le niveau du signal était de 25 dB inférieur à la valeur mesurée avec une antenne non protégée.

Une méthode de détermination du facteur de protection de l'emplacement consiste à calculer l'affaiblissement dû à la diffraction sur l'arête de l'obstacle; cette méthode est, toutefois, imprécise lorsqu'elle est appliquée à des obstacles qui se trouvent dans le champ proche de l'antenne. En partant de principes fondamentaux, on a donc entrepris d'étudier à l'aide d'un ordinateur [Dalgleish, 1975; Streete et Shinn, 1974] l'effet de diffraction sur une arête en lame de couteau dans le champ proche d'une grande antenne fonctionnant à 4 GHz; les résultats auxquels on est arrivé concordent bien avec des essais pratiques effectués à 9 GHz.

On peut aussi montrer qu'il est possible d'apporter une modification simple à la formule donnant la valeur de la diffraction sur l'arête, pour tenir compte du gain prévu des lobes latéraux de l'antenne. Cette modification permet de calculer les facteurs de protection de l'emplacement pour les obstacles proches qui, sous réserve de certaines restrictions (en particulier, le fait que les obstacles sont au-delà de la distance de Rayleigh définie par $D^2/2\lambda$, D étant le diamètre de l'antenne et λ la longueur d'onde), ont à moins de 3 dB près les mêmes valeurs que les facteurs calculés au moyen d'un ordinateur.

Le facteur de protection de l'emplacement obtenu par le calcul s'exprime par:

$$20 \log \left(\frac{\pi^2 \theta}{90} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \right) + 25 \log \left(1 - \frac{\theta}{\alpha} \right) \quad \text{dB} \tag{4}$$

où les symboles sont définis dans la légende de la Fig. 7. Le premier terme de l'expression détermine l'affaiblissement de référence du brouillage causé par l'arête du talus et le second terme est la correction à apporter pour tenir compte du changement de la direction d'arrivée du brouillage dû à l'obstacle.

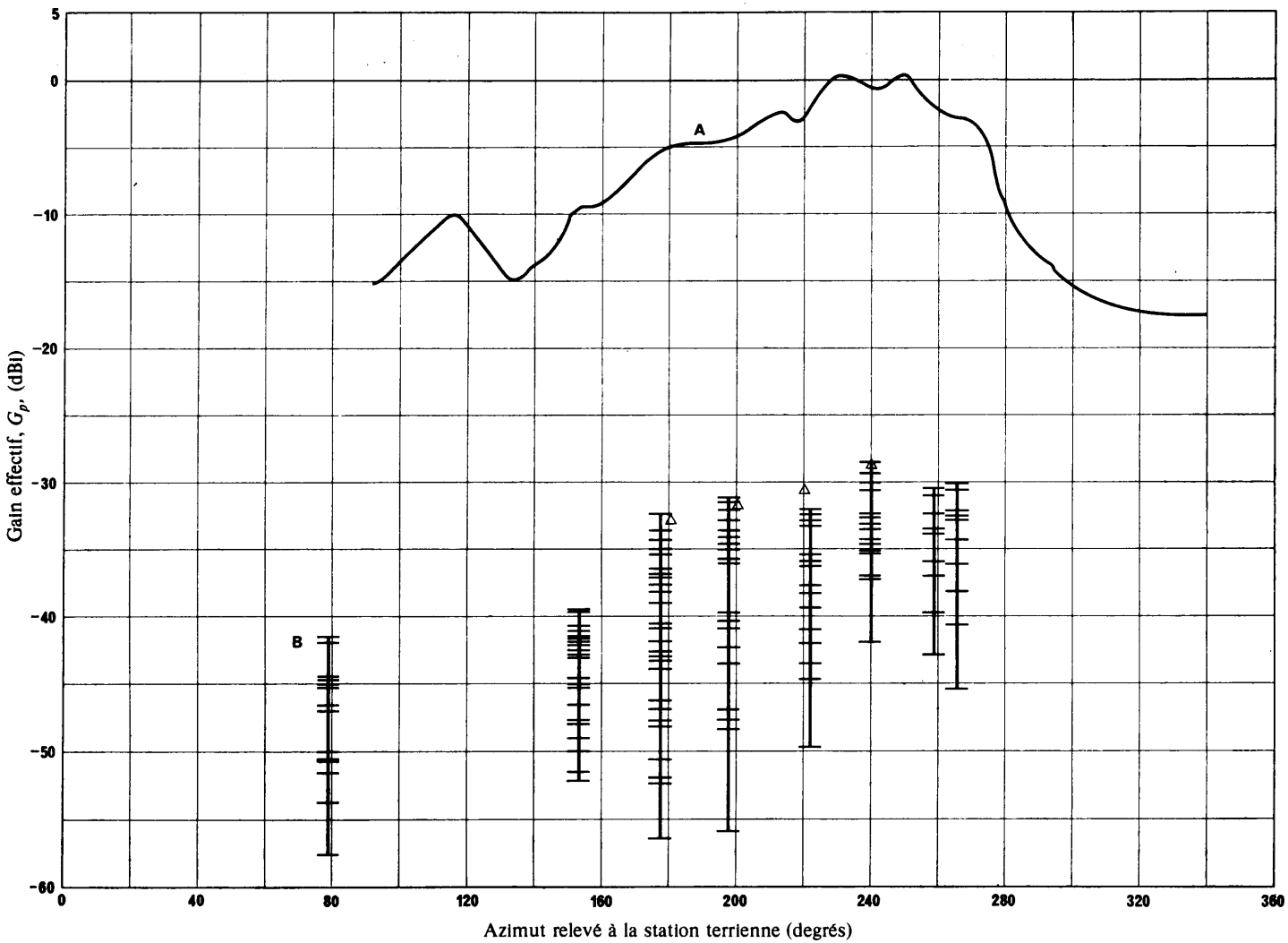


FIGURE 6 — *Diagramme du gain effectif dans le plan horizontal pour différentes positions de satellites (4 et 6 GHz)*

A : Gain d'antenne maximal dans le plan horizontal d'une antenne de 10 m de diamètre sans écran
B : Valeurs (mesurées et calculées) du gain de l'antenne dans le puits formant écran (△ valeurs calculées)

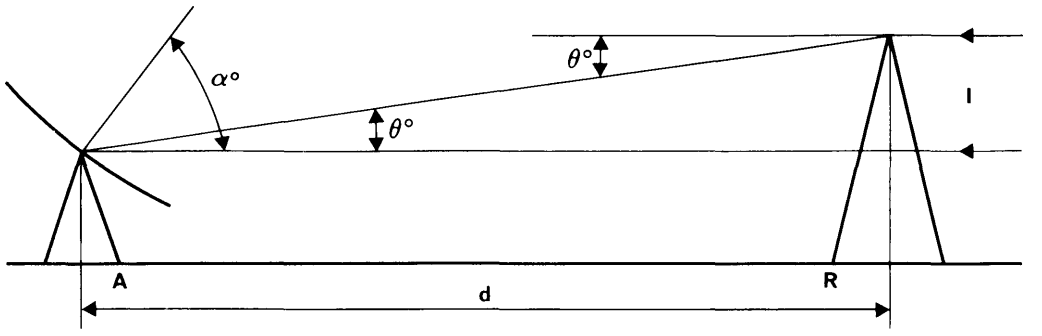


FIGURE 7 — *Protection de l'emplacement des antennes de station terrienne*

α: Angle de site de l'antenne, en degrés
θ: Angle de diffraction, en degrés
d: Distance entre l'antenne et le talus, en mètres
A: Antenne
R: Talus
I: Direction du trajet de brouillage

4.3 *Dispositifs d'annulation du brouillage*

Une troisième méthode utilise des moyens électroniques pour modifier les caractéristiques des lobes latéraux d'une antenne de station terrienne (voir le Rapport 875). On combine, en général, le signal reçu par une antenne de référence avec le signal reçu par l'antenne principale avec la phase et l'amplitude correctes afin que le gain dans les lobes latéraux soit effectivement égal à zéro dans la direction du signal brouilleur qui est ainsi annulé.

Ces dispositifs sont en service limité depuis quelque temps, mais ils ne sont pas encore suffisamment perfectionnés pour être utilisés en exploitation courante. Il convient d'encourager leur développement dans l'intérêt de l'économie du spectre.

4.4 *Technique de réduction du niveau des lobes latéraux dû aux rayonnements diffusés par les supports du réflecteur secondaire*

D'intenses rayonnements diffusés apparaissent sous des angles déterminés par la position et l'orientation des supports, étant donné que la phase du courant induit dans les supports coïncide avec la direction de ces angles. En conséquence, si l'onde incidente sur les supports est diffusée de façon aléatoire dans toutes les directions, le niveau des lobes latéraux pourra être réduit sous des angles spécifiques [Ogawa et autres, 1977; Matsunaka et autres, 1981]. La Fig. 8 montre un exemple de réduction que l'on peut obtenir dans les lobes latéraux grâce à une réduction de la diffusion des supports par l'utilisation d'un dispositif de diffusion des micro-ondes.

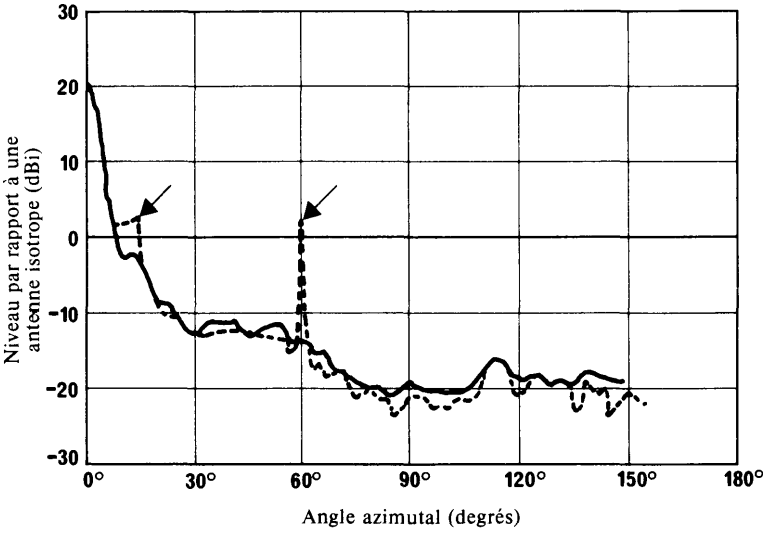


FIGURE 8 – *Effet de réduction des rayonnements diffusés obtenu avec une structure métallique cannelée*

(Polarisation rectiligne, 29,5 GHz)

——— avec plaques métalliques à courbure spéciale

– – – – sans plaques métalliques à courbure spéciale

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BJØNTEGAARD G. et PETTERSEN, T. [13-16 avril 1981] A shaped offset dual reflector antenna with high gain and low side-lobe levels. IEE Conf. Publ. N° 195, Part. 1, 163-167. IEE Second International Conference on Antennas and Propagation, Heslington, York, Royaume-Uni.

BOITHIAS, L. et BEHE, R. [1971] Directivité maximale en dehors de l'axe des ouvertures rayonnantes équiphases. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 26, **9-10**, 325-340.

DALGLEISH, D. I. [7 avril 1975] The influence of interference on the siting of earth-stations. IEE Conf. Publ. N° 126, International Conference on Satellite Communication Systems Technology, Londres, Royaume-Uni.

KREUTEL, R. W. [1976] Wide-angle sidelobe envelopes of a Cassegrain antenna. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 6, **1**, 71-88.

MATSUNAKA, N., BETSUDAN, S. et KATAGI, T. [juin 1981] Side-lobe level reduction by improvement of strut shape. IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) International Symposium et URSI, Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

MIZUGUTCH, M., AKAGAWA, M. et YOKOI, H. [octobre 1976] Offset dual reflector antenna. IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) International Symposium, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

OGAWA, E., HORI, T., TAKANO, T. et ISHIDA, N. [1977] Some Studies on 20/30 GHz Band Cassegrain Antenna for the Domestic Communication System Earth Station Paper Tech. Group on Antenna Propagation, Institute of Electronics Communication Engineers of Japan, AP77-22 (1977-06).

STREETE, M. A. et SHINN, D. H. [1974] Site shielding for earth-station antennae. *Electron. Lett.*, **8**, 120-121.

TAKANO, T., OGAWA, E., BETSUDAN, S. et SATO, S. [juillet 1980b] High efficiency and low side-lobe design for a large aperture offset reflector antenna. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-28, **4**, 460-466.

TAKANO, T., OGAWA, E., HORI, T. et SHINJI, M. [juin 1980a] Offset Cassegrain earth-station antenna for the Japanese domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, **6**, 883-889.

BIBLIOGRAPHIE

GOULD, R. G. et SCHMITT, C. [28-30 juin 1977]. Interference reduction techniques for satellite earth stations. 2nd Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Montreux, Suisse, 285-292.

IEE [avril 1975] Interference cancellation to an earth station. IEE Conf. Publ. N° 126, International Conference on Satellite Communication Systems Technology, Londres, Royaume-Uni.

ANNEXE II

CONTRIBUTION DE SOURCES EXTRA-ATMOSPHÉRIQUES A LA TEMPÉRATURE DE BRUIT D'UNE ANTENNE

1. Introduction

Aux fréquences qui intéressent le service fixe par satellite, on peut négliger la contribution à la température de bruit d'antenne apportée par la composante du bruit de fond constituée par le bruit cosmique; seules, les sources discrètes doivent être considérées. Ces sources discrètes, telles que le Soleil, la Lune et certaines des nébuleuses dont l'activité radioélectrique est parmi les plus intenses, telles que Cassiopée A, Taurus A, Cygnus A et Orion A, se trouvent réparties sur toute la sphère céleste, mais leurs dimensions angulaires sont faibles et l'antenne de réception d'une station terrienne ne les intercepte que rarement.

Dans la pratique, seuls le Soleil et la Lune apportent une contribution importante à la température de bruit d'antenne d'une station terrienne. En ce qui concerne le Soleil, sa température apparente (la température apparente dépend de la température solaire apparente et de la fraction du faisceau d'antenne qui intervient) est très élevée et le bruit reçu dans les lobes latéraux de l'antenne de la station terrienne peut également être important.

La température de bruit apparente du Soleil calme varie, à 4 GHz, entre 23 000 K au minimum d'activité solaire et 90 000 K au maximum d'activité solaire. Les résultats d'observations effectuées avec une antenne de 13 m montrent que la température de bruit des régions calmes est de 12 000 K à 12 GHz et de 9200 K à 18 GHz, le diamètre apparent du Soleil étant alors de 0,6°. En moyenne, la variation de la température de bruit du disque solaire est, à 9,4 GHz, d'environ 3 dB par rapport à la température des régions calmes; à 17 GHz, elle est inférieure à 1 dB pour une activité solaire maximale (la variation de la température de bruit diminue quand la fréquence s'élève).

En outre, les sursauts du bruit radioélectrique solaire peuvent susciter une augmentation de la température de bruit. Ces sursauts se produisent le plus souvent en période d'activité solaire maximale où, pendant 1% du temps, à 4 GHz, la température de bruit apparente sera supérieure d'environ 50% à celle relevée en période de Soleil calme. Pendant de plus faibles pourcentages de temps, l'augmentation de la température de bruit apparente sera considérablement plus grande.

Le bruit en provenance de la Lune peut accroître la température de bruit du système de 250 K au maximum à 4 GHz.

2. Apparition des brouillages dus au bruit solaire

La République fédérale d'Allemagne a étudié dans le détail, pour les orbites équatoriales de satellites, les apparitions de brouillages d'origine solaire dans le système de réception d'une antenne de station terrienne [CCIR, 1963-66].

La zone de brouillage définie dans cette étude dépend de l'ouverture d'angle de la source, du diagramme de rayonnement de l'antenne et de l'augmentation de température de bruit admissible pour l'antenne de réception de la station terrienne, de l'ordre de 15 dB. Cette zone est de forme approximativement circulaire et il semble que son diamètre apparent soit de 1,2° pour une antenne type de 30 m fonctionnant à 4 GHz. Les brouillages se produisent quand le soleil radioélectrique entre dans la zone de brouillage.

Pour des satellites sur des orbites équatoriales aux altitudes égales ou supérieures à 10 400 km, aucune station terrienne n'est exempte de brouillages d'origine solaire. Pour les stations situées dans l'hémisphère Nord, les brouillages se produisent seulement durant les six mois qui s'écoulent entre les équinoxes d'automne et de printemps; pour les stations situées dans l'hémisphère Sud, les brouillages se produisent seulement au cours des six autres mois. Dans toute station, les brouillages se produisent au cours de deux périodes durant cet intervalle de six mois; chacune de ces périodes peut être de plusieurs jours consécutifs. Pour des satellites géostationnaires, le brouillage se produit une fois par jour.

Il est possible de calculer la différence d'heure à laquelle se produiront les brouillages dans deux stations terriennes différentes quand on connaît la position du satellite et les coordonnées de la station terrienne. La différence d'heure à laquelle les brouillages sont observés entre des stations situées dans le même hémisphère est approximativement de 35 min au maximum et, pour une large gamme de valeurs, elle ne varie guère avec la longitude du satellite.

Il est possible de déduire la durée d'une occurrence de brouillage si on connaît la dimension de la zone de brouillage et les vitesses angulaires du Soleil et du satellite par rapport à la station terrienne. La durée de brouillage maximale pour un diamètre apparent de la zone de brouillage de 1,2° est de 5 min environ pour un satellite géostationnaire.

Une étude de la durée annuelle prévue des brouillages d'origine solaire, quand on utilise des satellites synchrones, a été faite au Japon [CCIR, 1966-69]; ses résultats sont indiqués sur la Fig. 9.

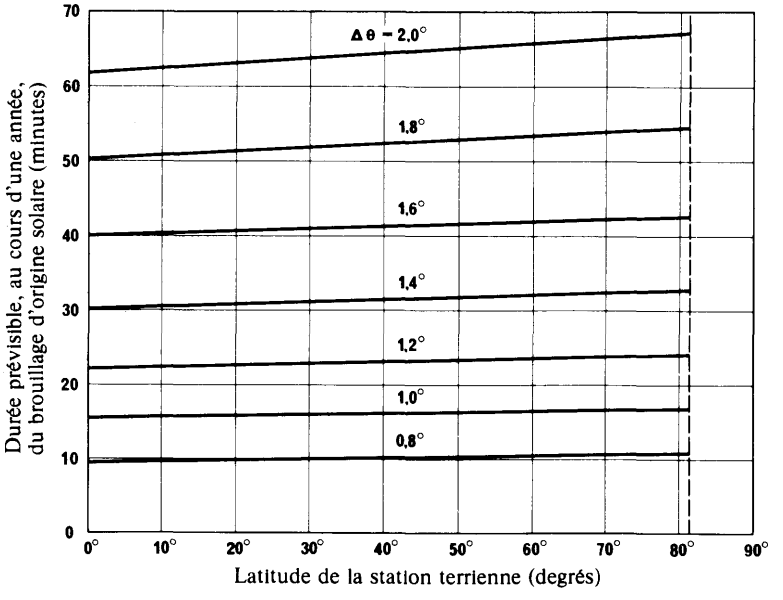


FIGURE 9 – *Durée prévisible du brouillage d'origine solaire pour un satellite géostationnaire*

$\Delta\theta$: diamètre angulaire de la zone de brouillage

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR

[1963-66]: IV/223 (République fédérale d'Allemagne).

[1966-69]: IV/314 (Japon).

ANNEXE III

MESURES DU RAPPORT G/T AVEC L'AIDE DE RADIOSOURCES STELLAIRES

1. Introduction

Il est souhaitable d'établir une méthode pratique pour mesurer avec une grande précision le rapport gain/température de bruit (G/T), afin de pouvoir comparer les valeurs mesurées dans les diverses stations. La présente Annexe contient la description d'une méthode permettant de mesurer directement le rapport G/T à l'aide de radiosources stellaires. Il convient de noter cependant que la méthode utilisant des radiosources stellaires n'est pas d'un emploi pratique dans certains cas et qu'une autre technique permettant de mesurer directement le rapport G/T consiste à utiliser un signal porteur émis par un satellite, comme il est décrit dans [Sion, 1981]. Cela pourrait être une méthode utile en exploitation, moins complexe que la méthode des radiosources stellaires, à condition de veiller, lorsqu'on effectue les mesures, à ne pas dépasser la puissance surfacique maximale admissible prescrite par le Règlement des radiocommunications. Cette méthode doit être vérifiée pratiquement.

2. Méthode de mesure

Le rapport G/T peut se calculer au moyen de la formule ci-dessous, une fois mesuré le rapport des puissances de bruit à la sortie du récepteur:

$$\frac{G}{T} = \frac{8\pi k\,(r-1)}{\lambda^2\,\Phi\,(f)} \tag{5}$$

où

k : constante de Boltzmann;

λ : longueur d'onde (m);

$\Phi(f)$: puissance surfacique spectrale du rayonnement de la radiosource stellaire (unité: $Wm^{-2}\ Hz^{-1}$) à la fréquence (f) au moment de la mesure;

$r =$ $(P_n + P_{st})/P_n$;

P_n : puissance de bruit correspondant à la température du bruit du système T;

P_{st} : puissance de bruit supplémentaire quand l'antenne est pointée exactement vers la radiosource stellaire.

G (gain de l'antenne) et T (température de bruit du système) sont rapportés à l'entrée du récepteur.

Dans la formule (5), il est tenu compte de ce que le rayonnement de l'étoile est en général polarisé de façon aléatoire et qu'on en reçoit une partie seulement, correspondant à la polarisation de réception. La densité de flux de rayonnement $\Phi(f)$ est fournie par des mesures radioastronomiques.

Un avantage fondamental existe ici par rapport au calcul de G/T à partir de valeurs G et T mesurées séparément. Au lieu de deux mesures absolues, il suffit d'une mesure relative pour déterminer le rapport.

3. Radiosources stellaires appropriées

Les radiosources discrètes Cassiopée A, Cygnus A et Taurus A semblent être les plus appropriées pour la mesure du rapport G/T par les stations terriennes. Toutefois, la densité de flux de Cygnus A peut se révéler insuffisante en certains cas.

Ces radiosources stellaires n'ont pas toutes une déclinaison telle qu'elles soient parfaitement appropriées pour des stations terriennes situées à certaines latitudes australes.

Le Tableau I donne des valeurs de la densité de flux des sources de bruit citées plus haut [Baars et Hartsuijker, 1972; Dent et autres, 1974].

Une étude récente a montré qu'il est possible d'obtenir une précision de mesure de gain d'antenne supérieure à $\pm$ 0,45 dB (3σ) dans les bandes des 4 et 6 GHz en utilisant de nouvelles puissances surfaciques et des facteurs de correction pour le prolongement angulaire des radiosources stellaires [Satoh et Ogawa, 1982], surtout dans le cas de l'étoile A de la constellation du Taureau. Les administrations sont priées de poursuivre l'étude afin de vérifier ces nouveaux paramètres.

Pour les mesures à des fréquences supérieures à 10 GHz, il est intéressant de se servir des ondes radioélectriques provenant de planètes, par exemple Vénus, au même titre que les radiosources stellaires susmentionnées. Les ondes radioélectriques émises par les planètes ont pour avantages que les densités de flux augmentent avec la fréquence et que leur angle solide est très petit, ce qui rend négligeables les erreurs dues à l'extension angulaire. La densité de flux $\Phi(f)$ a pour expression:

$$\Phi\,(f) = \frac{4\pi k\,Tb\,(f)}{\lambda^2}\,(1-\cos\psi) \tag{6}$$

où

$Tb(f)$: température de brillance d'une planète (K);

ψ : demi-diamètre.

TABLEAU I — *Densité de flux des radiosources stellaires*

Radiosource	Cassiopée A	Taurus A	Cygnus A
$\Phi(4)$ Densité de flux à 4 GHz ($Wm^{-2}\ Hz^{-1}$)	1061×10^{-26} (1)	685×10^{-26}	489×10^{-26}
$\Phi(f)$ Densité de flux à f GHz	$\Phi(4)\left(\frac{f}{4}\right)^{-0,792}$ (1) (2)	$\Phi(4)\left(\frac{f}{4}\right)^{-0,263}$ (2)	$\Phi(4)\left(\frac{f}{4}\right)^{-1,205}$ (3)

(1) Valeur pour janvier 1965 (voir le § 4.3).

(2) Où f est compris entre 1 et 16 GHz. Les formules peuvent être provisoirement utilisées jusqu'à 32 GHz.

(3) Où f est compris entre 2 et 16 GHz.

La valeur de $\Phi(f)$, qu'on déduit de la formule (6), est à introduire dans la formule (5) pour obtenir la valeur de G/T d'une station terrienne. La valeur de ψ peut se trouver dans American Ephemeris and Nautical Almanac (US Government Printing Office, Washington DC 20402). Dans le cas de la planète Vénus, les valeurs de $Tb(f)$ sont estimées à 580 K et 506 K respectivement à 15,5 et 31,6 GHz [Yokoi et autres, 1974]. Comme les valeurs de $Tb(f)$ sont fondées sur un nombre limité de données mesurées aux deux fréquences considérées, et qu'elles n'ont pas encore été déterminées pour d'autres fréquences, les administrations sont instamment invitées à effectuer des études et à en communiquer les résultats sur la variation de $Tb(f)$ en fonction de la fréquence, dans une gamme aussi large que possible, pour confirmer et développer les résultats indiqués ici.

4. Termes de correction et évaluation des erreurs

La valeur corrigée du rapport G/T s'exprime par:

$$(G/T)_c = G/T + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \qquad (7)$$

où

C_1 : correction pour l'absorption atmosphérique;

C_2 : correction pour l'étendue angulaire des radiosources stellaires;

C_3 : correction pour la variation du flux avec le temps;

C_4 : correction pour la variation du flux avec la fréquence.

Tous ces termes doivent être exprimés en dB.

4.1 *Absorption atmosphérique*

Une correction simple de l'absorption atmosphérique, pour des angles de site supérieurs à 5°, est donnée par:

$$C_1 = A/\sin \alpha \qquad (8)$$

où:

A : absorption pour un trajet simple vertical, en dB;

α : angle de site.

A 4 GHz, A = 0,036 dB; aux autres fréquences, la valeur de A est donnée par la Fig. 10.

4.2 *Etendue angulaire des radiosources stellaires*

Si l'étendue angulaire de la radiosource stellaire dans le ciel est sensiblement supérieure à l'ouverture du faisceau d'antenne, il faut appliquer une correction. Cette correction, C_2, est représentée sur la Fig. 11.

On a calculé la courbe pour Taurus A en supposant que la distribution de sa brillance peut être représentée par une forme gaussienne elliptique ayant un grand axe de 3,8 min d'arc et un petit axe de 2,5 min d'arc [Mayer et Hollinger, 1968; Wilson, 1972; Johnston et Hobbs, 1969].

La courbe pour Cassiopée A est calculée [Kanda, 1976] par convolution numérique de la carte de la brillance observée [Rosenberg, 1970] avec le diagramme de puissance d'antenne dont on peut obtenir une approximation par la fonction $(\sin x)/x$. La distribution de la brillance de Cassiopée A peut être bien rendue par un modèle de distribution en anneau (diamètre intérieur de 0,044° et diamètre extérieur de 0,071°) avec un rapport de 0,391 entre la brillance intérieure et la brillance extérieure. Si on utilise ce modèle, le terme de correction peut aussi être calculé aisément en combinant deux modèles de disque dont le terme de correction peut être exprimé au moyen d'une formule conventionnelle. Les résultats obtenus avec ce modèle concordent avec ceux que donnent les calculs poussés effectués par Kanda avec une erreur de 0,06 dB.

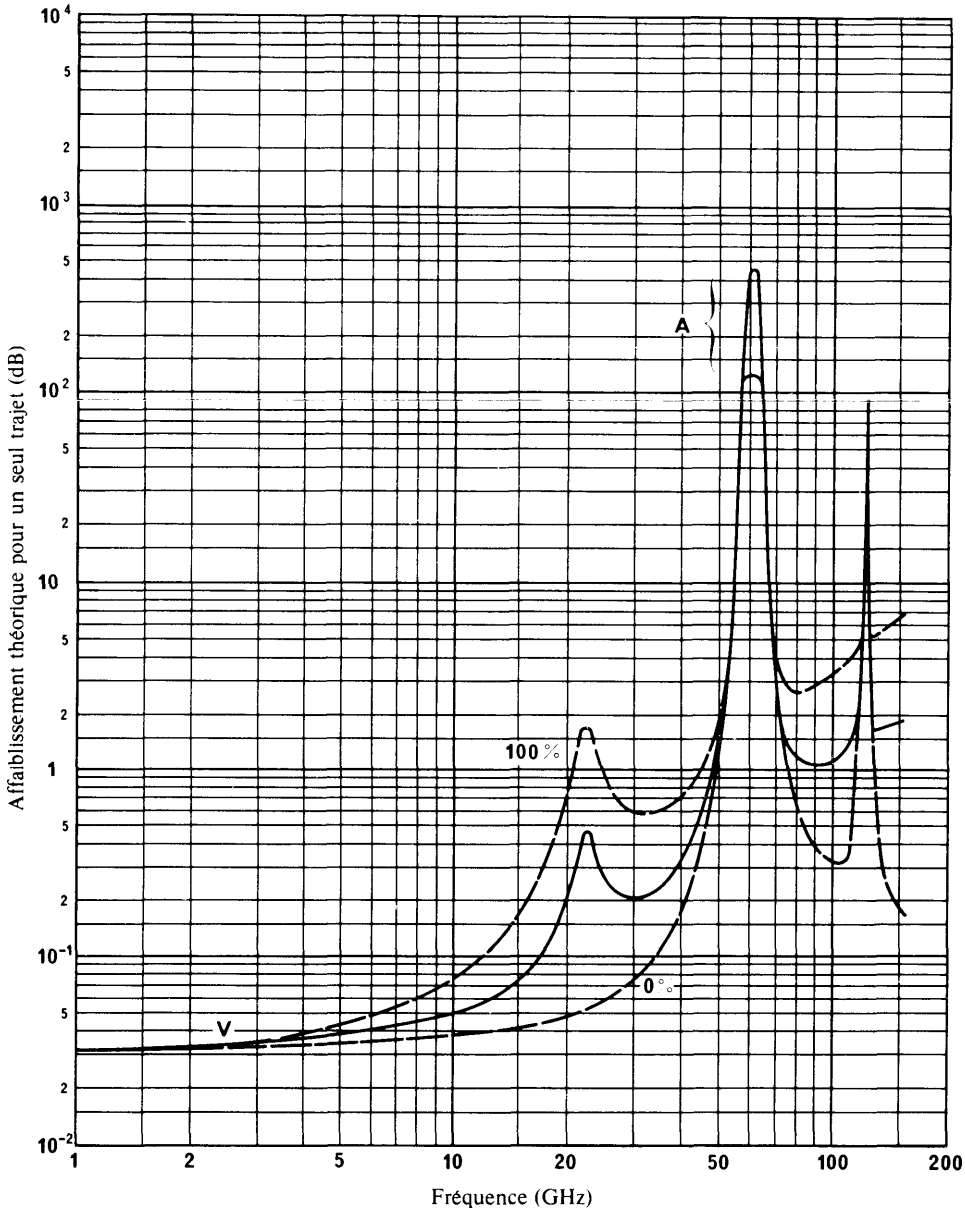


FIGURE 10 – *Affaiblissement théorique pour un trajet simple vertical à travers l'atmosphère (calculé en utilisant l'atmosphère standard des Etats-Unis d'Amérique pour le mois de juillet à 45° de latitude nord). Les courbes en trait plein s'appliquent à une atmosphère modérément humide. Les courbes en tirets s'appliquent à l'affaiblissement vertical pour les limites de 0 et 100% d'humidité relative*

A: Domaine d'incertitude V: Vertical

Pour Cygnus A, la courbe s'obtient en appliquant la même méthode que pour Cassiopée A. La carte de distribution de la brillance fondée sur le calcul est la carte à résolution fine [Hargrave et Ryle, 1974] observée à 5 GHz. La distribution de la brillance mesurée peut être bien rendue par un modèle à double colonne de 0,02 min d'arc dans chaque diamètre de colonne séparée par une distance angulaire de 2,06 min d'arc. Il est aussi possible de calculer le temps de correction à partir de ce modèle et les résultats obtenus concordent avec ceux des calculs détaillés avec une erreur de 0,1 dB.

Si le modèle gaussien elliptique est adopté pour Taurus A, le modèle en anneau pour Cassiopée A et le modèle à double colonne pour Cygnus A, on dispose d'approximations appropriées pour le terme de correction. Ces modèles peuvent aussi être utiles pour mesurer l'ouverture du faisceau de l'antenne à mi-puissance en observant la largeur de la courbe de dérive à mi-intensité. Il s'ensuit que le terme de correction de l'étendue angulaire des radiosources stellaires peut être déterminé à partir de la courbe de dérive observée même sans qu'il soit nécessaire de connaître l'ouverture du faisceau de l'antenne à mi-puissance.

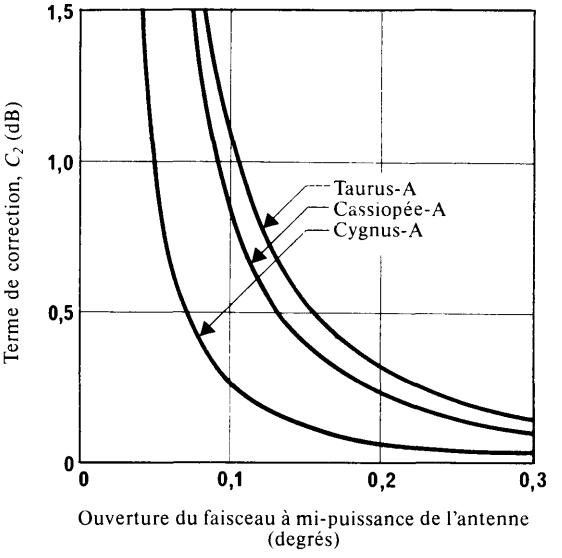


FIGURE 11a – *Terme de correction pour l'étendue angulaire des radiosources stellaires*

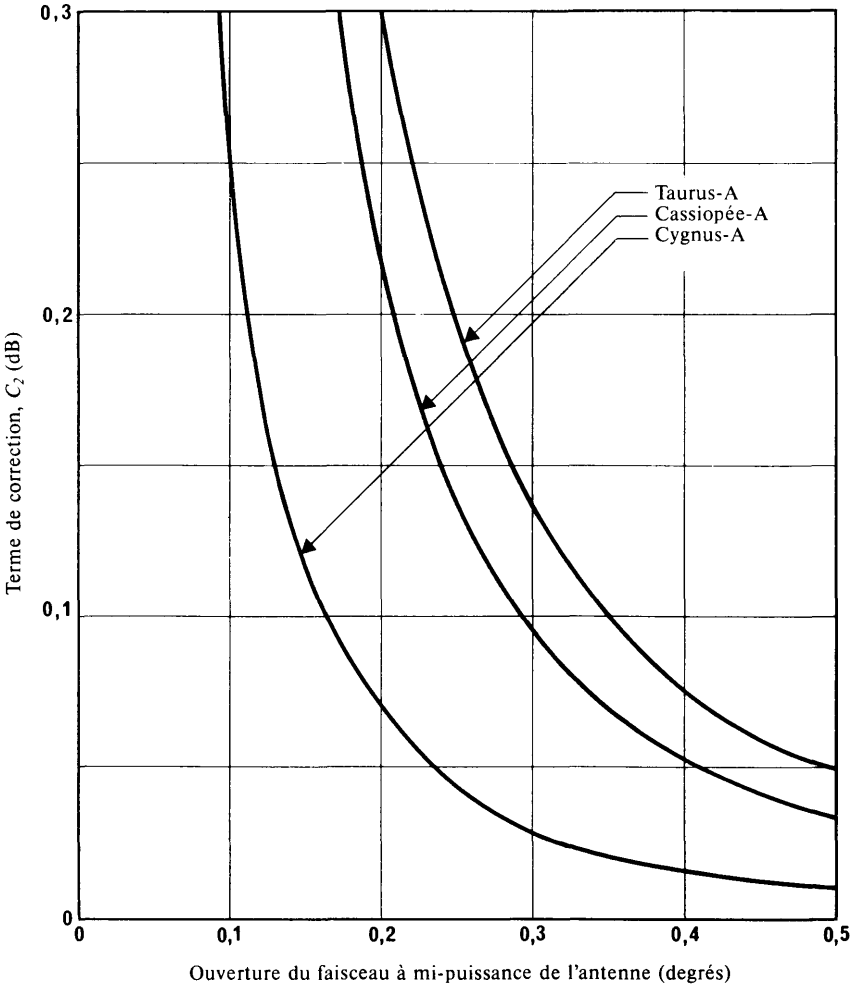


FIGURE 11b – *Terme de correction pour l'étendue angulaire des radiosources stellaires*

4.3 *Variation du flux avec le temps*

Cassiopée A se caractérise par une diminution de flux avec le temps, en fonction de la fréquence [Dent et autres, 1974]. Cette correction peut se faire avec le terme

$$C_3 = (0{,}042 - 0{,}0126 \log f)n \qquad \text{dB}$$

où

n : nombre des années écoulées ($n = 0$ en janvier 1965)

f : fréquence (GHz).

4.4 *Variation du flux avec la fréquence*

La variation du flux avec la fréquence est également indiquée au Tableau I.

4.5 *Effets de polarisation*

Taurus A est polarisée elliptiquement, et il faut utiliser la moyenne de deux lectures relevées dans deux directions orthogonales. Lorsqu'on effectue des mesures à l'aide de Cassiopée A ou de Cygnus A, ces précautions sont inutiles.

4.6 *Evaluation des erreurs*

L'erreur relative maximale s'exprime par:

$$\frac{\Delta(G/T)}{G/T} = \frac{\Delta\Phi(f)}{\Phi(f)} + \frac{\Delta r}{r} \times \frac{r}{(r-1)} \tag{10}$$

où l'on tient compte des erreurs sur $\Phi(f)$ et sur r.

L'erreur relative qui résulte de la mesure du rapport de puissance r se manifeste nettement lorsque le bruit de la radiosource stellaire (P_{st}) n'est pas suffisamment élevé par rapport au bruit du système (P_n), parce que $r/(r-1) \rightarrow \infty$ pour $r \rightarrow 1$. La précision de la mesure serait considérablement réduite si r était inférieur à 2 dB. Ce serait le cas pour les valeurs suivantes de G/T:

Cassiopée A	36 dB(K^{-1})
Taurus A	37 dB(K^{-1})
Cygnus A	39 dB(K^{-1})

Si $r = 2{,}5$ (4 dB), par exemple, r doit être mesuré à $\pm$ 0,01 (0,05 dB) près dans le cas où l'erreur ne doit pas excéder 0,02 (0,1 dB environ).

L'erreur introduite par:

$$\frac{\Delta\Phi(f)}{\Phi(f)}$$

est d'environ 0,02. Il subsiste une incertitude supplémentaire de $\pm$ 0,01 dans les corrections appliquées. Ainsi, l'erreur maximale totale pour de grands angles de site est d'environ 0,05, soit $\pm$ 0,2 dB environ.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAARS, J. W. M. et HARTSUIJKER, A. P. [1972] The decrease of flux density of Cassiopeia A and the absolute spectra of Cassiopeia A, Cygnus A and Taurus A. *Astron. and Astrophys.*, Vol. 17, 172-181.

DENT, W. A., ALLER, H. D. et OLSEN, E. T. [février 1974] The evolution of the radio spectrum of Cassiopeia A. *Astrophys. J.*, Vol. 188, L11-L13.

HARGRAVE, P. J. et RYLE, M. [1974] Observations of Cygnus A with 5-km radio telescope. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc. (GB)*, Vol. 166, 305-327.

JOHNSTON, K. J. et HOBBS, R. W. [octobre 1969] Distribution of brightness in polarisation of Taurus A and brightness distribution of NGC 1976 at 9,55 mm wavelength. *Astrophys. J.*, Vol. 158, 145-150.

KANDA, M. [septembre 1976] An error analysis for absolute flux density measurements of Cassiopeia A. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-25, **3**, 173-182.

MAYER, C. H. et HOLLINGER, J. P. [janvier 1968] Polarized brightness distribution over Cassiopeia A, the Crab Nebula and Cygnus A at 1.55-cm wavelength. *Astrophys. J.*, Vol. 151, 53-63.

ROSENBERG, I. [1970] Distribution of brightness and polarization in Cassiopeia A at 5.0 GHz. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc. (GB)*, Vol. 151, 109-122.

SATOH, T. et OGAWA, A. [1982] Exact gain measurements of large aperture antennas using celestial radio sources. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, **1**, 157-161.

SION, A. [1981] New method for direct G/T measurement using satellite signals. *Electron. Lett.*, Vol. 17, **23**, 883-885.

WILSON, A. S. [1972] The structure of Crab Nebula at 2.7 and 5 GHz-I. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc. (GB)*, Vol. 157, 229-253.

YOKOI, H., YAMADA, M., AKAGAWA, M., OGAWA, A. et MIZUGUCHI, Y. [mars 1974] Flux-densities of celestial radio sources at 15.5 and 31.6 GHz. *Trans. Inst. Electron. and Comm. Engrs. of Japan*, Vol. 57-B, **3**, 184-190.

ANNEXE IV

ASPECTS SOUS LESQUELS SE PRÉSENTE LE PROBLÈME DE LA PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS A FRÉQUENCE RADIOÉLECTRIQUE DANS LES STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE

La présente Annexe donne des renseignements sur la base desquels il est possible de calculer les valeurs maximales des puissances surfaciques produites par les stations terriennes pourvues d'antennes du type à réflecteur parabolique par rapport à la puissance rayonnée par le dispositif d'alimentation.

Les puissances surfaciques maximales ont été calculées pour les trois zones suivantes:

- la zone de champ lointain qui, par définition, s'étend de l'infini à $(2\ D^2)/\lambda$

  où

  D : diamètre de l'antenne en mètres

  λ : longueur d'onde en mètres
- la zone de champ proche, que limitent l'ouverture de l'antenne et $(2\ D^2)/\lambda$
- la zone délimitée par la source primaire (et secondaire s'il en existe), les réflecteurs et l'ouverture rayonnante.

Les réflexions sur le sol peuvent exercer un effet notable sur la puissance surfacique observée en certains points et, lors du calcul des valeurs à prévoir, on a admis que la puissance surfacique effective pouvait atteindre quatre fois sa valeur en espace libre. C'est-à-dire que les calculs doivent donner des résultats prudents.

Pour illustrer l'utilisation des renseignements donnés dans la présente Annexe, on trouvera ci-dessous un exemple de calcul pour lequel on s'est fondé, par hypothèse, sur une puissance surfacique de 10 mW/cm^2. Les données obtenues sont indiquées à la Fig. 12 où, pour un diamètre d'antenne donné, les valeurs maximales de puissance rayonnée par le dispositif d'alimentation de l'antenne sont précisées pour:

- le champ lointain,
- le centre du plan de l'ouverture,
- la valeur de crête du champ proche.

Le champ dans la zone délimitée par le dispositif d'alimentation et l'ouverture rayonnante n'est pas indiqué à la Fig. 12. Il est très élevé dans certaines directions et il est peu vraisemblable qu'il soit coupé par des êtres humains lors du fonctionnement normal de la section terrienne.

Même si une valeur de 10 mW/cm^2 a été utilisée dans cet exemple, d'autres valeurs de puissances surfaciques sûres peuvent trouver place dans cette Fig. 12 en déplaçant simplement l'échelle des ordonnées. A cet égard, il convient que les administrations appliquent la valeur de puissance surfacique qu'elles estiment la plus appropriée.

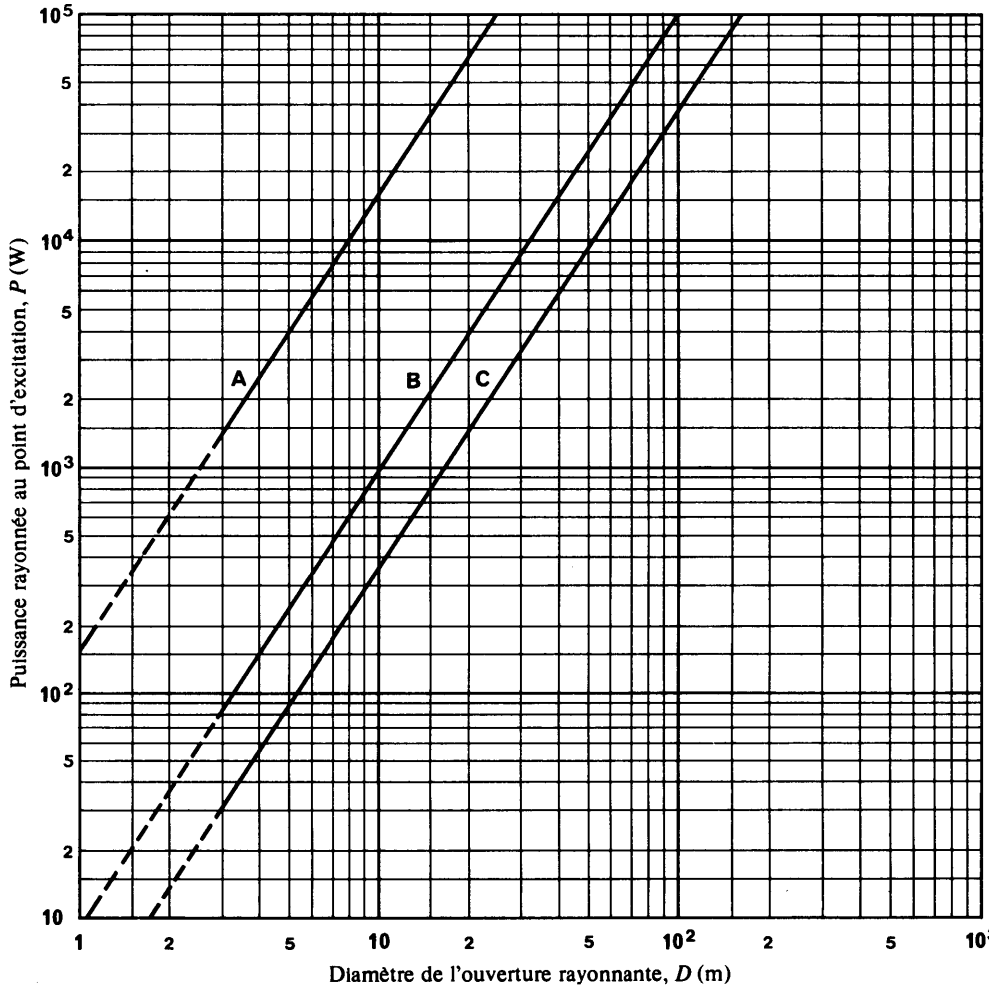


FIGURE 12 – *Dangers causés par le rayonnement à fréquence radioélectrique. Valeurs calculées de la puissance rayonnée dans l'hypothèse d'une puissance surfacique maximale admissible de 10 mW/cm², considérée comme inoffensive dans l'axe du faisceau principal*

A : Limite du champ lointain
B : Centre du plan de l'ouverture
C : Valeur de crête du champ proche

Note. — Si l'on marque un point sur le diagramme dont l'abscisse correspond au diamètre de l'antenne et l'ordonnée correspond à la puissance considérée et que ce point est situé à la gauche de l'une des courbes ou des trois courbes, il y a possibilité pour que la puissance surfacique maximale supposée inoffensive (10 mW/cm²) soit dépassée dans la zone correspondant à la lettre désignant la courbe (ou dans les zones correspondant aux lettres désignant les trois courbes) à la droite du point.

RAPPORT 868 *

CONTRIBUTIONS A LA TEMPÉRATURE DE BRUIT D'UNE ANTENNE DE RÉCEPTION DE STATION TERRIENNE

Mesures de la température de bruit d'une antenne

(Question 13/4)

(1982)

1. Introduction

La température de bruit de l'antenne d'une station terrienne est l'un des éléments de la température de bruit d'un système de réception; elle peut comprendre des contributions liées aux éléments atmosphériques (vapeur d'eau, nuages ou précipitations) en plus du bruit provenant de sources extra-terrestres tels que le bruit solaire ou cosmique. Les bruits produits par l'environnement de l'antenne (bruit artificiel et signaux brouilleurs) ainsi que le bruit thermique produit par le système de réception, qui peuvent parvenir aux bornes de l'antenne, peuvent aussi contribuer à la température de bruit de l'antenne de la station terrienne. De nombreux facteurs contribuent à la température de bruit de l'antenne et notamment ceux qui dépendent des conditions météorologiques ne sont pas stables et le bruit qui en résulte aura donc une distribution statistique dans le temps. Connaître ces facteurs et leurs variations prévues aiderait beaucoup les concepteurs de stations terriennes; il est donc nécessaire de rassembler des données sur les caractéristiques de température de bruit des antennes de stations terriennes existantes d'une manière qui puisse être utilisée au mieux à l'avenir.

On trouvera dans le présent Rapport les résultats de mesures de température de bruit d'antenne effectuées aux fréquences 11,45 GHz, 11,75 GHz et 17,6 GHz, résultats qui ont permis d'établir une distribution cumulative de cette température et de déterminer l'influence de la température de bruit par temps clair sur l'angle de site.

2. Matériel de mesure

Les mesures ont été effectuées aux Pays-Bas en utilisant une série de radiomètres munis d'une antenne Cassegrain de 10 m alimentée par un cornet cannelé.

Pour les mesures de bruit effectuées en République fédérale d'Allemagne sur une antenne de 18,3 m de diamètre, on a utilisé la méthode du facteur y, par ciel clair.

3. Résultats des mesures

La Fig. 1 représente les distributions cumulatives de la température de bruit d'antenne mesurée à 11,75 et 17,6 GHz. Les valeurs portées sur cette figure sont celles que l'on a mesurées sur le bord de sortie du cornet.

La température de bruit de l'antenne est surtout due à l'affaiblissement atmosphérique. Les effets cosmiques et le rayonnement provenant du sol y contribuent également.

Les mesures dont les résultats sont représentés sur la Fig. 1 ont eu lieu alors que l'angle de site de l'antenne était de 30°. Elles ont été effectuées entre août 1975 et juin 1977. Les conditions qui ont prévalu pendant cette période peuvent être considérées comme typiques de la pluviosité locale.

La Fig. 2 représente la façon dont la température de bruit de l'antenne dépend de son angle de site, par temps clair. Les valeurs de la Fig. 2 correspondent à celles de la Fig. 1 pour un pourcentage du temps de 50%. Une analyse des résultats de la Fig. 2 a montré que la température de bruit de l'antenne a deux composantes, dont l'une dépend de l'angle de site et dont l'autre est pratiquement constante.

Cette composante constante résulte:

- du rayonnement de fond cosmique en hyperfréquence d'environ 2,8 K [Penzias, 1968];
- du bruit provenant du rayonnement de la Terre; cette contribution varie légèrement avec l'angle de site de l'antenne en raison de la forme des lobes latéraux de son diagramme de rayonnement. Il y a lieu de s'attendre à une valeur de 4 à 6 K de cette provenance;
- du bruit dû aux pertes ohmiques du système d'antenne, de l'ordre de 0,04 dB; cette contribution doit être de 3 à 4 K.

La composante de la température de bruit de l'antenne liée à l'angle de site est due aux pertes dans la vapeur d'eau et l'oxygène de l'atmosphère. Pour estimer sa valeur, on peut représenter les courbes expérimentales à la Fig. 2 par la formule suivante (voir le Rapport 720), qui donne une précision allant jusqu'à 1% pour des angles de site supérieurs à 15°;

$$T_A = T_c + T_m (1 - \beta_o^{\operatorname{cosec} \alpha}) \qquad \text{K} \qquad (1)$$

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 5.

dans laquelle:

T_A : température de bruit de l'antenne,

T_c : composante constante de la température de bruit,

T_m : température moyenne de rayonnement du milieu absorbant,

β_o : coefficient de transmission de l'atmosphère dans la direction du zénith,

α : angle de site de l'antenne.

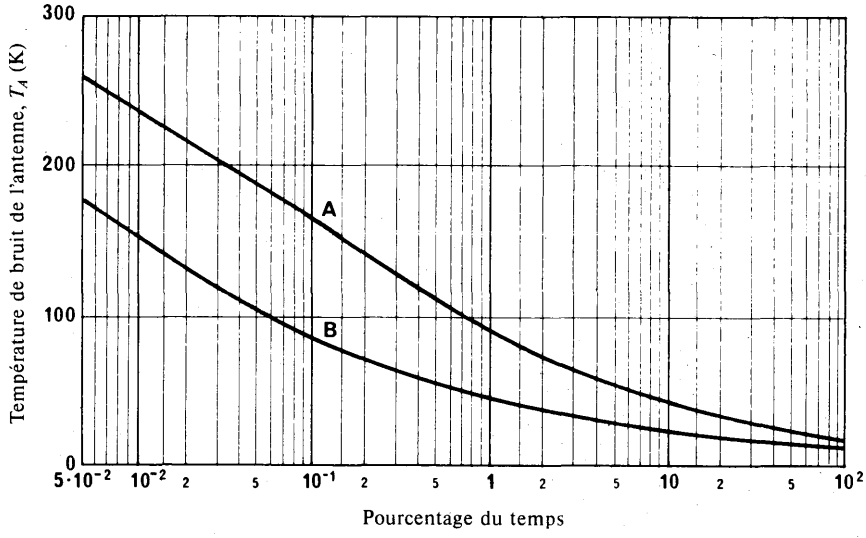


FIGURE 1 – *Valeur mesurée de la température de bruit de l'antenne en fonction du pourcentage du temps pendant lequel chaque niveau est dépassé*

Courbes A: 17,6 GHz, 7200 h
B : 11,75 GHz, 8100 h

Angle de site: 30°

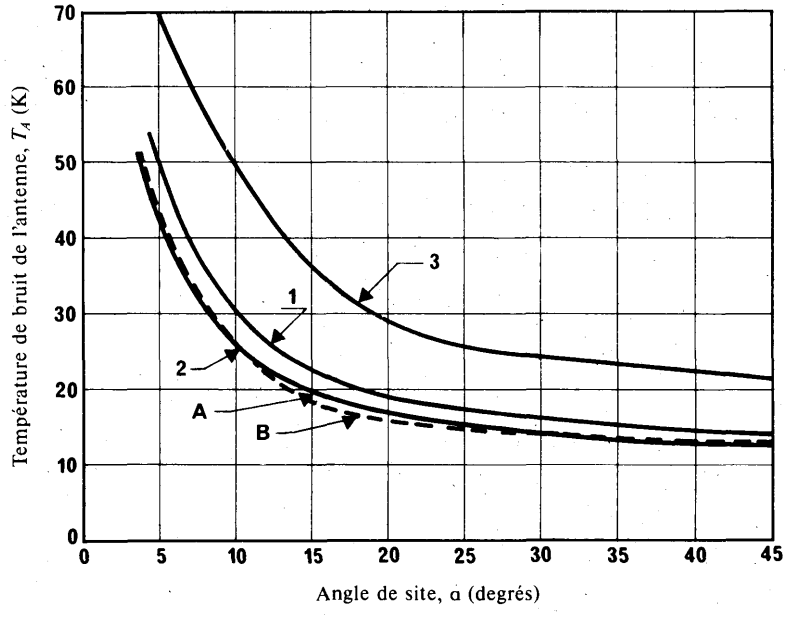


FIGURE 2 – *Température de bruit de l'antenne (T_A) en fonction de l'angle de site (α) de l'antenne par ciel clair*

Note 1. – Pour les caractéristiques des courbes 1, 2 et 3, se reporter au Tableau I.
Note 2. – Les mesures ont été faites dans les conditions suivantes:

Caractéristiques	Courbes 1 et 3	Courbe 2 { A : calculé B : mesuré
Température	279 K	294 K
Humidité relative	82%	51%
Humidité absolue	6 g/m^3	10 g/m^3
Pression barométrique	1016 mbar	1018 mbar

Pour des angles de site compris entre 5° et 90°, les constantes de la fonction T_A sont celles qui sont indiquées au Tableau I.

TABLEAU I

N° de référence (voir Fig. 2)	Fréquence (GHz)	Diamètre de l'antenne (m)	T_c (K)	β_0	Technique de mesure	Station de référence
1	11,75	10	8,3	0,9858	Radiomètre	10 m OTS Pays-Bas
2	11,45	18,3	7,3	0,988	Facteur *y*	18,3 m OTS/IS-V Rép. féd. d'Allemagne
3	17,6	10	8,3	0,9738	Radiomètre	10 m OTS Pays-Bas

D'après les constantes indiquées au Tableau I et pour $\alpha = 90°$ dans la formule 1, le second membre de cette expression donne la température du ciel au zénith due à l'absorption atmosphérique. On peut calculer la température de brillance au zénith en ajoutant la température du ciel au zénith et la température du rayonnement cosmique en hyperfréquence. Dans ce cas particulier, où les pertes dans l'atmosphère sont très faibles, on peut se contenter d'une simple addition.

On peut encore calculer la température du ciel au zénith en prenant comme paramètre l'humidité à la surface de la Terre (voir le Rapport 720). Le résultat de ces calculs ainsi que les valeurs trouvées par les mesures sont résumées dans le Tableau II.

TABLEAU II

Fréquence (GHz)	Température du ciel au zénith		Température de brillance au zénith valeurs mesurées (K)
	Valeurs calculées (K)	Valeurs mesurés (K)	
11,75	3,2	3,9	6,7
17,6	7,8	7,2	10,0

Note. – Les administrations sont invitées à fournir des données supplémentaires concernant la température de bruit d'antennes de réception de stations terriennes, d'une manière qui permette de répondre à la Question 13/4.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PENZIAS, A. A. [septembre 1968] Measurements of cosmic microwave background radiation. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-16, **9**, 608-611.

RAPPORT 709-1

ÉTUDE DU COUPLAGE ENTRE UNE ANTENNE DE STATION TERRIENNE ET UNE ANTENNE DE LIAISON DE TERRE

(Programme d'études 1C/4)

(1978-1982)

1. Introduction

Pour des raisons d'économie du spectre des fréquences et de traitement du trafic transitant dans des stations terriennes fonctionnant en diversité, il peut être souhaitable d'utiliser les mêmes bandes de fréquences pour les liaisons spatiale et de Terre. Pour atteindre ce but sans imposer de limitations de fréquences, il faut:

- que l'antenne de Terre soit située en arrière de l'antenne de la station terrienne;
- que la valeur du rapport avant-arrière de l'antenne de Terre soit élevée.

Le programme de mesure qui a été entrepris offre une bonne corrélation avec une formule permettant d'évaluer la valeur du facteur de couplage dans l'axe. Un autre programme, qui a montré la possibilité de faire fonctionner à proximité une antenne de Terre partageant la même bande de fréquences dans des conditions d'exploitation, a également été exécuté, dans les conditions suivantes:

- le système de Terre émet avec une puissance minimale dans la bande de réception de la station terrienne;
- le récepteur du système de Terre à la station terrienne fonctionne dans la bande d'émission de la station terrienne;
- un couplage lâche est assuré entre l'antenne de la station terrienne et les antennes de Terre, et
- les rapports de puissance sont critiques et peuvent nécessiter le réglage des caractéristiques de transmission dans le faisceau hertzien.

2. Facteur de couplage

On a mis au point, en appliquant la théorie géométrique de la diffraction, une formule relativement simple pour évaluer le facteur de couplage entre une grande antenne de station terrienne et une antenne isotrope située sur la projection vers l'arrière de son axe focal. Les mesures faites montrent que ce facteur peut être prédit assez correctement. La Fig. 1 montre les paramètres géométriques pour le calcul du facteur de couplage avec la formule:

$$C = \frac{P_r}{P_t} = \frac{\lambda}{64\pi^2} G_0 \frac{1}{l^2} \frac{\cos^2 \varphi}{\sin^2 (\psi/2)} \qquad (\theta = 0) \qquad (1)$$

où les angles et les distances sont représentés sur la Fig. 1 et G_0 représente le gain du réflecteur secondaire d'alimentation dans la direction passant par le bord du réflecteur principal. La valeur de G_0 est assez constante sur toute la surface du réflecteur principal (en particulier dans le cas des systèmes Cassegrain modelés); elle est approximativement donnée par $4\ \pi/\Omega^2$, Ω étant l'angle inclus du réflecteur. Toutefois, en raison de la diffraction par le réflecteur secondaire et des effets du diagramme d'alimentation, la valeur de G_0 décroît très rapidement immédiatement au-delà du bord; c'est cette valeur réduite qui doit être utilisée dans la formule (1). On peut normalement prendre pour G_0 une valeur d'environ 12 dB au-dessous de la valeur 10 log $4\ \pi/\Omega^2$ dans la direction nominale de la première zone non masquée à 6 GHz, dans le cas de grandes antennes de station terrienne.

On peut aussi évaluer le facteur de couplage entre une grande antenne de station terrienne et une antenne isotrope située dans le secteur arrière de son réflecteur et se fondant sur la théorie géométrique de la diffraction [CCIR, 1978-82]. Les résultats des calculs effectués d'après cette méthode sont présentés sur la Fig. 2a qui indique la perte par couplage pour divers angles θ et distances l.

La Fig. 2b montre les facteurs de couplage, mesurés entre une grande antenne et une antenne isotrope.

Pour faire la démonstration pratique du principe consistant à utiliser les mêmes bandes de fréquences pour les liaisons spatiale et de Terre, on a procédé à un autre programme de mesures. La Fig. 3 montre le couplage entre un cornet à gain normalisé et une antenne de 30 m en fonction de l'angle de polarisation et la distance de l'antenne de la station terrienne. De plus, un faisceau hertzien de 12 km a été établi afin de démontrer la possibilité d'utiliser les mêmes fréquences pour l'interconnexion. L'antenne de station terrienne avait une polarisation circulaire et l'antenne de faisceau hertzien de Terre avait une polarisation rectiligne. L'antenne voisine de 3 m à réflecteur en cornet, émettant dans la bande des 4 GHz, était située de manière que son ouverture fût visible d'une partie du bord de l'antenne de la station terrienne. La situation géométrique des deux antennes a eu pour résultat un couplage relativement fort; en pratique, la plupart des autres dispositions n'auraient donné qu'un couplage plus faible.

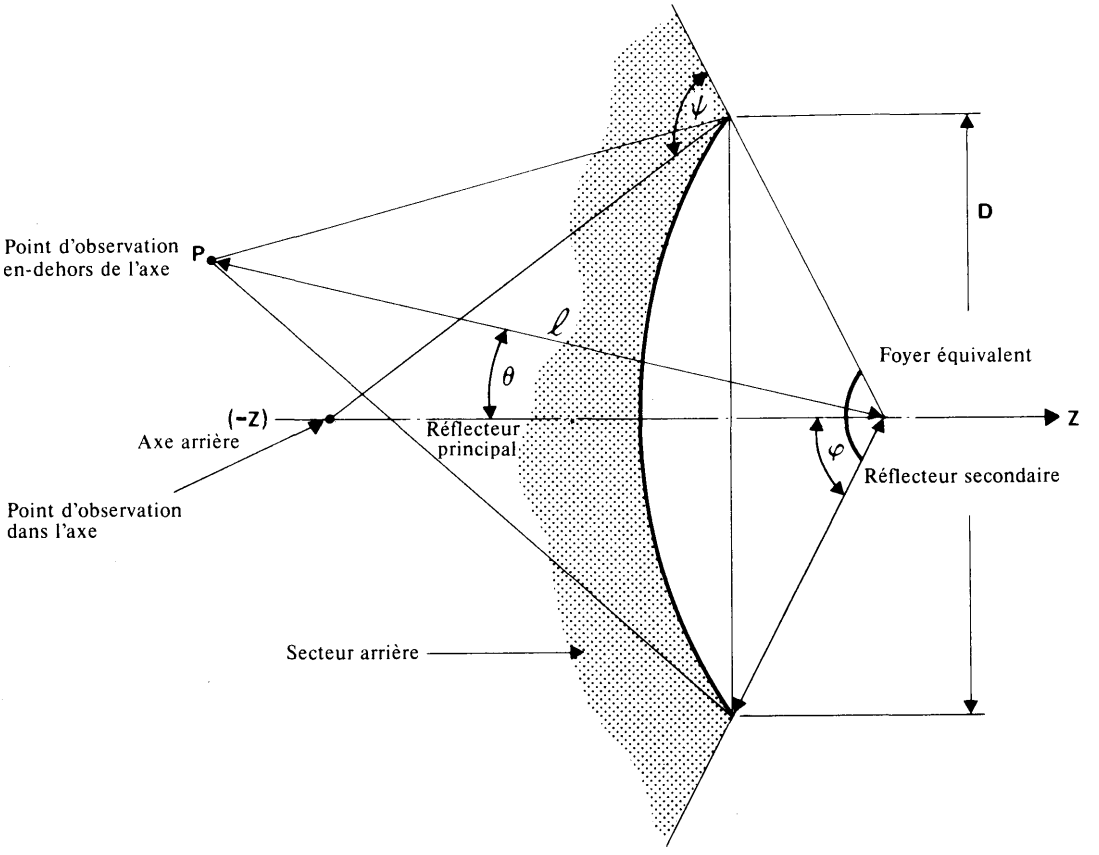


FIGURE 1 – *Paramètres géométriques pour calculer le facteur de couplage entre une grande antenne Cassegrain et une antenne isotrope située dans sa zone d'ombre géométrique*

D : diamètre d'ouverture

φ : moitié de l'angle d'ouverture

ψ : angle de diffraction sur le bord du réflecteur

ℓ : distance entre le foyer et le point d'observation

θ : angle mesuré entre l'axe et le point d'observation P

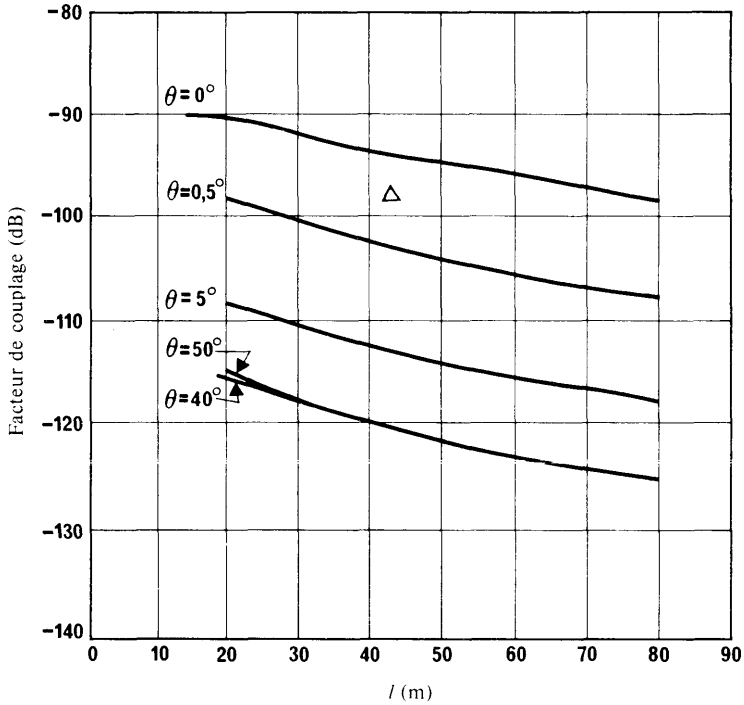


FIGURE 2a – *Valeurs calculées du facteur de couplage entre une antenne de 32,0 m et une antenne isotrope située sur la projection vers l'arrière de l'axe focal de la première (6,0 GHz)*

Δ : point à l = 41,5 m
et θ = 0° données mesurées de la Fig. 2 b

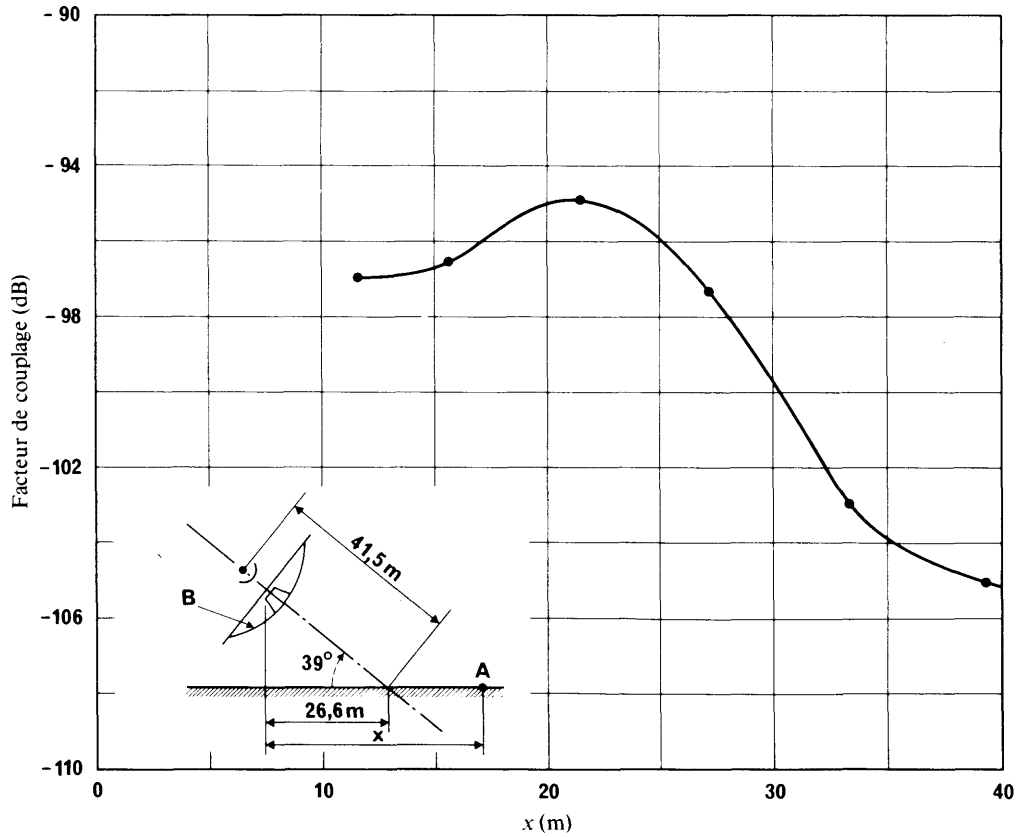


FIGURE 2b — *Valeurs mesurées du facteur de couplage entre une antenne de 30 m de diamètre et une antenne isotrope située en arrière*

A : Antenne isotrope
B : Paraboloïde de 30 m, f = 6,4 GHz

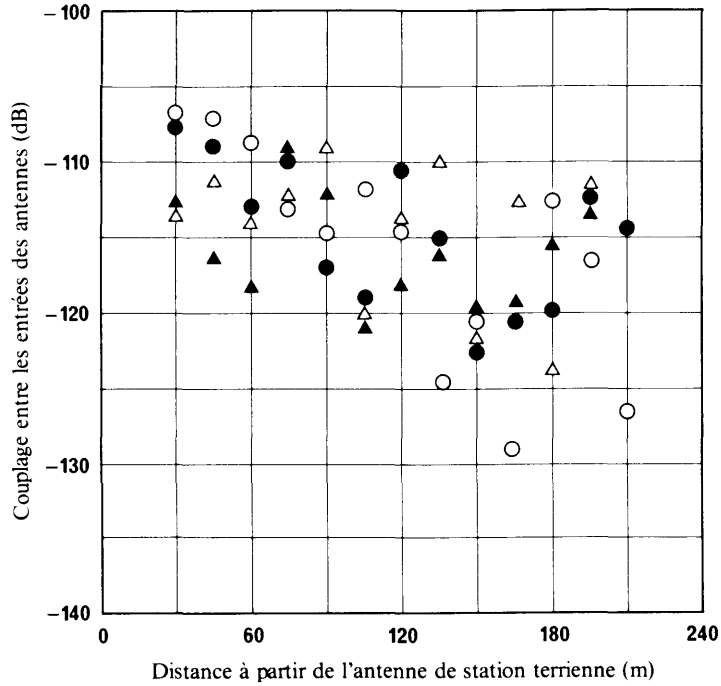


FIGURE 3 — *Couplage entre les bornes de l'antenne de la station terrienne et du cornet à gain normalisé, en fonction de la distance*

- ● 180° par rapport à l'azimut du lobe principal de l'antenne de station terrienne, polarisation verticale
- ○ 180° par rapport à l'azimut du lobe principal de l'antenne de station terrienne, polarisation horizontale
- ▲ 120° par rapport à l'azimut du lobe principal de l'antenne de station terrienne, polarisation verticale
- △ 120° par rapport à l'azimut du lobe principal de l'antenne de station terrienne, polarisation horizontale

3. Possibilité d'implanter au même point une antenne de station terrienne et une antenne de liaison de terre

On a pu établir, dès le début de la démonstration, que le brouillage le plus intense, causé à la réception sur l'antenne de la station terrienne des signaux à 4 GHz en provenance du satellite, était dû au rayonnement de l'antenne à réflecteur en cornet voisine émettant dans la bande des 4 GHz.

Après étalonnage du faisceau hertzien et des liaisons avec le satellite, on a mesuré le rapport des puissances de bruit dans la voie la plus élevée de la bande de base pour un grand nombre de valeurs de la fréquence porteuse sur les liaisons spatiale et de Terre. La liaison avec le satellite a été réglée jusqu'à ce que l'on ait obtenu 7500 pWp en l'absence de brouillage dû à la liaison de Terre. La liaison de Terre avait été établie en conformité avec les caractéristiques d'émission du satellite Intelsat-IV, et on a fait varier, sur cette liaison, la puissance d'émission de 5 en 5 dB jusqu'à ce que l'on ait obtenu un niveau de bruit de 10 000 pWp sur la liaison spatiale. On a ensuite réduit l'indice de modulation multivoie sur le faisceau hertzien de Terre de 4 et 10 dB pour étudier la sensibilité du fonctionnement en fonction de la charge dans la bande de base. Les résultats de ces mesures, indiqués dans le Tableau I, concordent bien avec les valeurs calculées.

Le facteur de couplage dépend des conditions climatiques et de la polarisation des antennes. Si une coordination des fréquences entre les liaisons spatiale et de Terre permet l'entrelacement des fréquences, il s'ensuit une amélioration d'environ 15 dB, ce qui permet de mettre en jeu une puissance d'émission d'environ 5 dBW à 4 GHz.

Les effets du brouillage sur la liaison de Terre ont également été étudiés dans le cas le plus défavorable. A cet effet, on a utilisé un schéma d'ensemble comportant 972 voies sur la liaison spatiale et 1800 voies sur la liaison de Terre. Le brouillage dans la liaison de Terre n'a pas posé de problème sérieux, même avec une puissance considérablement réduite dans la liaison de Terre à 6 GHz. La mesure du rapport porteuse/brouillage a donné environ 30 dB, pour l'émission à 6 GHz depuis l'emplacement lointain avec une puissance réduite de seulement −12 dBW (correspondant à une puissance de −38 dBm à la réception). Le brouillage correspondant dans la bande de base n'a été que d'environ 1000 pWp, ce qui est très près de la valeur calculée.

TABLEAU I — *Résumé des caractéristiques de fonctionnement de la liaison spatiale*

Liaison spatiale (1)		Liaison de Terre			Facteur de couplage (dB)	Rapport *C/I* valeur mesurée (dB)	Rapport (*S/N*) sur la liaison spatiale	
Nombre de voies	Indice de modulation multivoie	Puissance d'émission (dBW)	Nombre de voies	Indice de modulation multivoie			Valeur calculée (dB)	Valeur mesurée (dB)
432	1,50	− 5,0	1800	0,49	142	33,2	51,6	50,2
432	1,50	− 5,0	1800	0,39	142	33,2	51,6	50,2
432	1,50	− 5,0	1800	0,25	142	33,2	51,3	50,2
432	1,50	−10,0	960	1,10	135	30,8	51,6	50,8
432	1,50	−10,0	960	0,70	135	30,8	51,5	50,8
432	1,50	−10,0	960	0,34	135	30,8	51,5	50,8
432	1,50	−10,0	432	1,50	131	27,0	51,2	50,7
432	1,50	−10,0	432	0,95	131	27,0	51,1	50,7
432	1,50	−10,0	432	0,47	131	27,0	51,1	50,7
252	1,54	− 5,0	1800	0,49	132	19,3	51,6	51,1
252	1,54	− 5,0	1800	0,39	132	19,3	50,8	50,6
252	1,54	− 5,0	1800	0,25	132	19,3	50,6	50,1
252	1,54	− 5,0	432	1,50	132	19,2	51,6	52,1
252	1,54	− 5,0	432	0,95	132	19,2	50,8	51,6
252	1,54	− 5,0	432	0,47	132	19,2	50,2	51,6
252	1,54	− 5,0	252	1,54	132	19,2	50,7	50,7
252	1,54	− 5,0	252	0,97	132	19,2	49,9	50,2
252	1,54	− 5,0	252	0,48	132	19,2	49,6	49,7
24	2,55	−10,0	1800	0,49	127	10,9	50,4	50,9
24	2,55	−10,0	1800	0,39	127	10,9	50,4	49,9
24	2,55	−10,0	1800	0,25	127	10,9	49,0	46,9
24	2,55	−10,0	432	1,50	129	12,2	49,4	49,9
24	2,55	−10,0	432	0,95	129	12,2	49,3	48,9
24	2,55	−10,0	432	0,47	129	12,2	46,2	47,6
24	2,55	−10,0	252	1,54	130	14,0	49,8	49,9
24	2,55	−10,0	252	0,98	130	14,0	49,6	49,4
24	2,55	−10,0	252	0,48	130	14,0	47,4	47,9

(1) On a utilisé les paramètres de la bande de base normalisée du satellite INTELSAT-IV.

Dans le cas de la combinaison de porteuses la plus défavorable, les effets du brouillage sur les transmissions dans la liaison de Terre en direction de la station terrienne ont été négligeables, pour toutes les valeurs de la puissance, à 6 GHz, de +13 dBW à −12 dBW. Pour une transmission depuis l'emplacement lointain avec une puissance réduite de seulement −12 dBW, la valeur mesurée du rapport porteuse/brouillage a été de 30 dB environ; le brouillage correspondant dans la bande de base était d'environ 1000 pWp. Une grande variété de signaux vidéo réels et de signaux vidéo d'essai ont été transmis, et aucune altération n'a été constatée dans l'une et l'autre liaison.

4. Confirmation expérimentale

Les résultats des essais confirment la possibilité de faire fonctionner, dans des conditions contrôlées, une station terrienne située à proximité de systèmes de Terre utilisant les mêmes bandes de fréquences.

Dans le cas le plus défavorable (celui du plus fort couplage entre deux systèmes d'antenne), il serait possible d'atteindre l'objectif de 10 000 pWp dans la liaison par satellite si la puissance d'émission du faisceau hertzien de Terre ne dépasse pas -10 dBW environ, puissance plus que suffisante pour de courts faisceaux hertziens.

Les mesures supplémentaires de couplage de l'antenne ont été effectuées dans la bande des 20 GHz. Les résultats en sont donnés dans l'Annexe I. Il a été confirmé que les niveaux de couplage d'antenne évalués sur la base des diagrammes de rayonnement en champ lointain concordent de façon satisfaisante avec les résultats des expériences. La méthode indiquée au § 3 de l'Annexe I s'applique non seulement à la zone arrière du réflecteur mais aussi lorsque les antennes se font face [Takano et autres, 1979].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TAKANO, T., OGAWA, E., SHINJI, M. et ISHIDA, N. [novembre 1979] 20, 30 GHz band Cassegrain earth station antenna for the Japanese domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, **11**, 1728-1731.

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/274 (Japon).

BIBLIOGRAPHIE

DODEL, H. et PONTANO, B. [automne 1973] Frequency reuse in collocated earth and terrestrial stations. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 3, **2**, 443-448.

JENKINS et WHITE [1967] *Fundamentals of Optics.* 4e éd., McGraw Hill Book Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

POTTS, J. B. [printemps 1972] Feasibility of collocating a radio relay station with a sharing earth station. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 2, **1**, 205-219.

ANNEXE I

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES SUR LE COUPLAGE D'UNE ANTENNE DE STATION TERRIENNE AU-DESSUS DE 10 GHz

1. Introduction

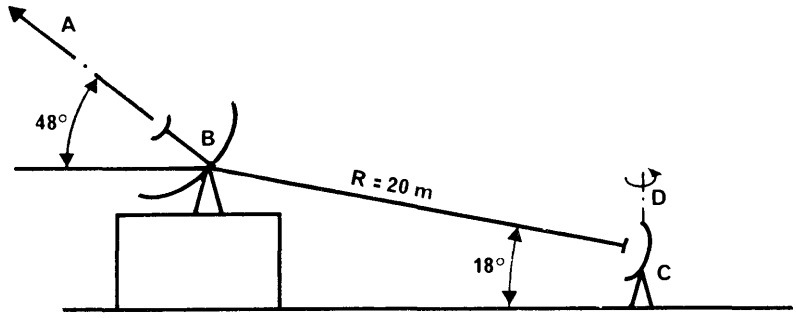
Le couplage d'une antenne de station terrienne avec une antenne de faisceau hertzien dans la bande 20/30 GHz doit être étudié car les deux systèmes partagent les mêmes bandes de fréquences [Takano et autres, 1979]. La présente Annexe décrit les résultats expérimentaux et les expériences visant à déterminer la dépendance directive de l'antenne pour les caractéristiques de couplage de cette antenne. Il apparaît, par ailleurs, que la méthode d'évaluation utilisant le diagramme de rayonnement en champ lointain est efficace lorsque l'on veut calculer le couplage des antennes en champ proche à des distances aussi petites que 20 m au même titre que la méthode de la zone de Fresnel décrite dans la partie principale du présent Rapport.

2. Résultats mesurés

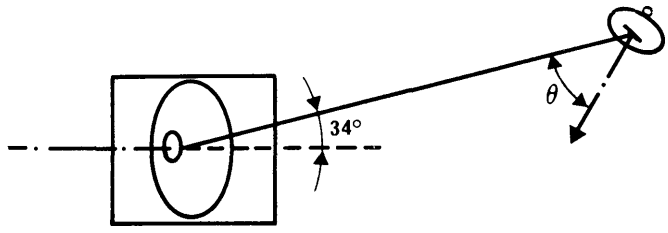
On a utilisé comme antennes de station terrienne une antenne Cassegrain symétrique par rapport à son axe [Takano et autres, 1979] de 11,5 m et une antenne Cassegrain à alimentation excentrée de 11,5 m [Takano et autres, 1980]. Une antenne Cassegrain de 2,7 m [Egami et autres, 1980] a été utilisée comme antenne de faisceau hertzien de Terre.

Les Fig. 4 et 5 indiquent les emplacements des antennes utilisées pour les mesures de couplage. Comme l'indique la Fig. 4, l'antenne de 2,7 m est située à l'arrière de l'antenne de la station terrienne. La distance entre les centres des deux antennes est d'une vingtaine de mètres. Dans le cas représenté à la Fig. 5, l'antenne de 2,7 m est située en face de l'antenne de la station terrienne et à une distance d'une trentaine de mètres. Les caractéristiques de couplage ont été mesurées en faisant pivoter l'antenne de 2,7 m en utilisant la fréquence de 19,5 GHz.

Les résultats des expériences sont indiqués aux Fig. 6 et 7. En abscisse sont indiqués les angles faits par l'axe du faisceau de l'antenne de 2,7 m et la direction de l'antenne de la station terrienne.



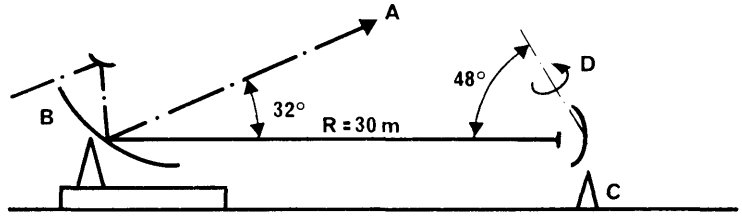
a) Vue latérale



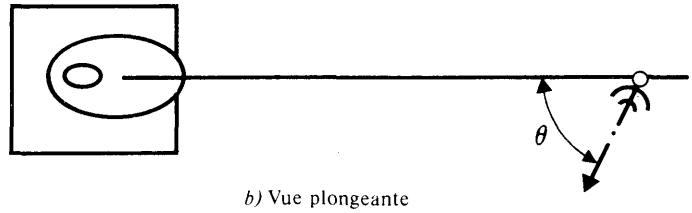
b) Vue plongeante

FIGURE 4 – *Emplacement des antennes pour les mesures de couplage (R = 20 m)*

A : direction du satellite
B : antenne de station terrienne de type Cassegrain et de 11,50 m
C : antenne de Terre de 2,70 m
D : axe de rotation
R : distance entre les deux antennes



a) Vue latérale



b) Vue plongeante

FIGURE 5 – *Emplacement des antennes pour les mesures de couplage (R = 30 m)*

A : direction du satellite
B : antenne de station terrienne de type Cassegrain et de 11,50 m
C : antenne de Terre de 2,70 m
D : axe de rotation
R : distance entre les deux antennes

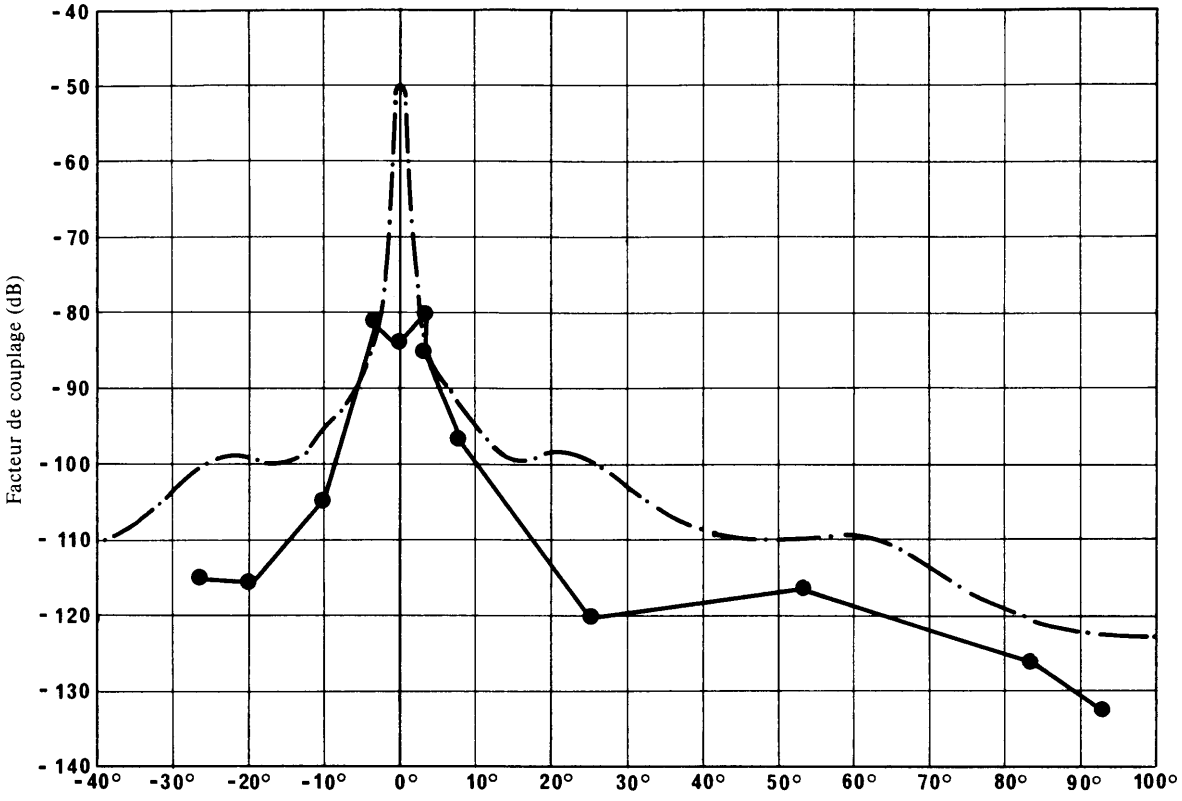


FIGURE 6 – *Résultats mesurés pour la configuration de la Fig. 4*

Mesuré

Estimé

(f = 19,5 GHz, R = 20 m)

3. Estimation du couplage des antennes

Les niveaux estimés (Fig. 6 et 7) sont calculés sur la base du diagramme de rayonnement en champ lointain et de l'affaiblissement de propagation. Le facteur de couplage C est donné par la formule:

$$C = \frac{G_t \cdot G_r}{L} \qquad (2)$$

dans laquelle:

G_t : gain de l'antenne d'émission dans la direction de l'antenne de réception;

G_r : gain de l'antenne de réception dans la direction de l'antenne d'émission;

L : affaiblissement de propagation $(4 \pi R/\lambda)^2$, R étant la distance entre les deux antennes et λ, la longueur d'onde utilisée.

Les résultats des essais montrent que les facteurs maxima de couplage peuvent être évalués approximativement à l'aide de la formule (2). Même si le niveau de couplage mesuré dépasse légèrement le niveau prévu, la différence reste inférieure à 5 dB. Le facteur de couplage peut aussi être estimé lorsque l'antenne de la liaison de Terre et celle de la station terrienne se font face, comme le montre la Fig. 5. L'intérêt de cette méthode est d'ailleurs suggéré dans l'Annexe I au Rapport 390.

La méthode d'estimation indiquée par la formule (2) semble plus efficace et plus pratique que celle qui correspond à la formule (1) du corps du présent Rapport, qui ne donne le facteur de couplage que pour l'axe arrière de l'antenne de la station terrienne. Les raisons de l'intérêt de cette méthode sont:

– il est possible de l'appliquer lorsque les antennes se font face aussi bien que lorsque l'antenne de la station terrienne ne fait pas face à l'antenne de Terre;

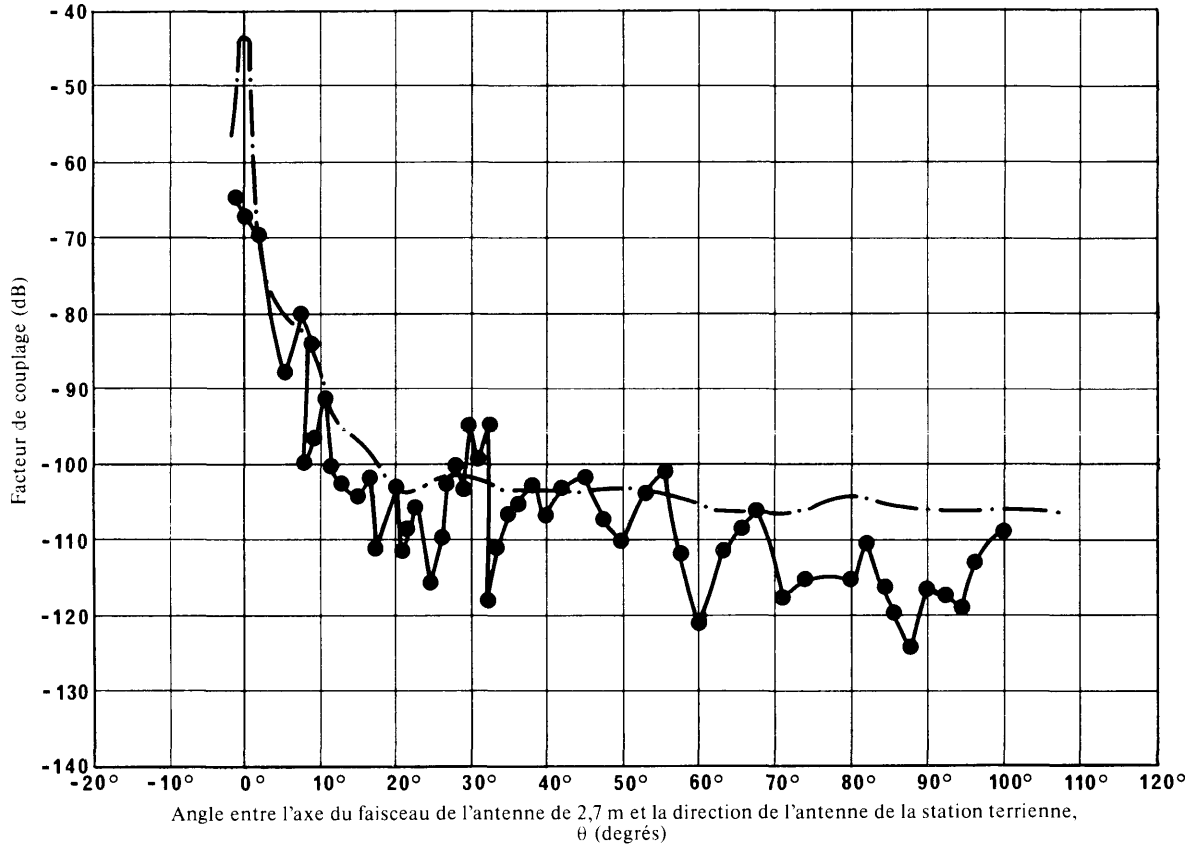


FIGURE 7 – *Résultats mesurés pour la configuration de la Fig. 5*

Mesuré

Estimé

(f = 19,5 GHz, R = 30 m)

– il est possible de l'appliquer à une antenne à réflecteur asymétrique telle qu'une antenne à alimentation excentrée;

– le facteur de dégradation du diagramme de rayonnement devrait tenir compte non seulement de la diffraction sur le bord du réflecteur, mais aussi de l'effet de la précision de construction de la surface du réflecteur et de la diffusion sur l'espace entre panneaux du réflecteur [Takano et autres, 1980]. De ce fait, la méthode d'estimation qui fait appel aux diagrammes de rayonnement donne un facteur de couplage plus raisonnable.

4. Conclusions

Les résultats des expériences menées dans la bande des 20 GHz confirment que le facteur de couplage de l'antenne peut être évalué approximativement au moyen des diagrammes de rayonnement en champ lointain. Cette méthode est efficace et peut être appliquée à toutes les orientations de l'antenne de la station terrienne.

De nouvelles études doivent être menées pour évaluer le couplage lorsque la distance de couplage est inférieure à 20 m.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

EGAMI, S., OKAMOTO, T. et FUKETA, H. [février 1980] K-band mobile earth-station for domestic satellite communications system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, **2**, 291-294.

TAKANO, T., OGAWA, E., HORI, T. et SHINJI, M. [juin 1980] Offset Cassegrain earth-station antenna for the Japanese domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, **6**, 883-889.

TAKANO, T., OGAWA, E., SHINJI, M. et ISHIDA, N. [novembre 1979] 20, 30 GHz band Cassegrain earth-station antenna for the Japanese domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, **11**, 1728-1731.

RAPPORT 385-1

POSSIBILITÉ DE PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES ENTRE LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET LES SERVICES DE TERRE

Critères affectant le choix de l'emplacement des stations terriennes dans le service fixe par satellite

(Programme d'études 2A/4)

(1966-1970)

1. Introduction

Le présent Rapport a pour objet de donner aux administrations des indications sur le choix des emplacements des stations terriennes du service fixe par satellite. L'accent est mis sur les évaluations et les recommandations qui intéressent les problèmes de brouillage.

2. Facteurs de brouillage

2.1 *Généralités*

Les brouillages causés aux stations terriennes peuvent avoir pour origine:

- des stations de Terre qui utilisent la même bande de fréquences que le système à satellites;
- des systèmes de radiodétection, dont les rayonnements harmoniques peuvent tomber dans la bande de fréquences utilisée par les récepteurs des stations terriennes [Prescott, 1968];
- des stations de Terre, y compris celles des faisceaux hertziens transhorizon, dont les rayonnements harmoniques tombent dans les bandes utilisées par les récepteurs des stations terriennes;
- des systèmes de radiolocalisation et de faisceaux hertziens fonctionnant dans des bandes adjacentes aux bandes de réception de la station terrienne.

2.2 *Diffusion par les précipitations*

On étudie actuellement les méthodes qui permettraient d'annuler les effets de la diffusion par les précipitations lors du choix des emplacements; il convient de se référer aux Sections relatives à la radiométéorologie, aux télécommunications spatiales et aux facteurs de propagation intervenant dans les brouillages, des travaux de la Commission d'études 5 pour les renseignements concernant les effets de la diffusion par les précipitations.

2.3 *Autres sources de brouillage électrique*

Il convient de tenir compte de l'influence possible des lignes à haute tension, des installations électriques qui fonctionnent à proximité, des systèmes d'allumage, des équipements industriels et d'autres sources de perturbations. A noter cependant que ce problème n'est pas gênant dans la pratique.

2.4 *Brouillage par les aéronefs*

Encore que l'analyse quantitative du problème soit difficile à faire, des systèmes ayant les caractéristiques de fréquence et d'émission spécifiées au § 2.1 peuvent donner lieu à des brouillages mutuels imputables à des réflexions de l'énergie par des aéronefs qui traversent le lobe principal de rayonnement de la station terrienne. Parmi les précautions à prendre dans le choix de l'emplacement, il convient d'éviter la proximité de routes aériennes, notamment près des grands aéroports.

3. Analyse des brouillages

Lorsqu'on étudie dans le détail un problème de brouillage, il faut se procurer les renseignements suivants sur les sources de brouillage possibles:

3.1 Emplacements exacts; fréquences; niveaux de puissance; dimensions, gains et diagrammes de rayonnement des antennes; azimuts de réception et d'émission; facteurs d'utilisation; largeurs des impulsions; taux d'impulsions; classe d'émission; rayonnements harmoniques et non essentiels (émission et réception). Lorsqu'il s'agit de stations de faisceaux hertziens fonctionnant dans la bande partagée, on peut appliquer les principes directeurs exposés dans le Rapport 382 (détermination de la distance de coordination) et dans le Rapport 448 pour l'évaluation des brouillages; en pareils cas, il est inutile de se procurer toutes les données énumérées plus haut.

3.2 En règle générale, il n'est pas nécessaire de mesurer les affaiblissements de propagation, sauf dans les cas où l'on ne peut pas prévoir exactement les caractéristiques de ce trajet. Il est recommandé d'utiliser le Rapport 569 pour calculer les valeurs prévues de l'affaiblissement de transmission de référence.

3.3 Il semble qu'il y aurait intérêt à employer des appareils de mesure dans les cas où les caractéristiques de l'émetteur sont inconnues, en particulier dans les bandes d'harmoniques. Il convient toutefois de faire ces mesures lorsqu'il est possible de déterminer ces caractéristiques sans l'intervention d'effets de propagation. Cela implique que l'équipement de mesure doit être installé en visibilité directe de l'émetteur, mais pas obligatoirement à l'emplacement de la station terrienne.

3.4 Après que l'on aura étudié le profil du trajet le long du grand cercle entre la station terrienne et un émetteur brouilleur, on pourra résoudre, par des essais de courte durée, les problèmes posés par l'existence d'effets tels que ceux des réflexions en dehors du trajet, etc.

4. Précautions à prendre dans le choix de l'emplacement

On peut citer un certain nombre de règles fondamentales qui sont de nature à réduire, le plus possible, l'acuité des problèmes de brouillage. Ces règles sont les suivantes:

4.1 Eviter les trajets en visibilité directe entre la station et les émetteurs brouilleurs.

4.2 Eviter de choisir, pour la station terrienne, un emplacement tel qu'à l'émetteur l'angle formé par l'arc de grand cercle allant vers la station terrienne et la direction du lobe principal de l'antenne de l'émetteur soit inférieur à 5°.

4.3 Respecter une distance minimale de 50 km environ par rapport aux émetteurs, lorsque l'effet d'écran du terrain est d'environ 3° à 4°. Cette distance peut être ramenée à environ 20 km pour un effet d'écran de l'ordre de 10°.

Les règles énoncées ci-dessus sont valables pour un emplacement quelconque. Celles que l'on trouvera ci-après doivent être appliquées lorsqu'on choisit l'emplacement de stations destinées à communiquer avec des satellites sur orbite équatoriale:

- choisir un emplacement situé plus au sud que celui de l'émetteur (et inversement dans l'hémisphère Sud);
- éviter des emplacements pour lesquels il peut exister des sources de brouillage possibles dans des azimuts où l'on pourrait être obligé de faire fonctionner l'antenne de la station terrienne sous de petits angles de site;
- il y a lieu d'éviter les zones côtières avec exposition maritime; dans les cas où il apparaît avantageux d'envisager de telles zones, on déterminera expérimentalement la probabilité de brouillage imputable aux installations de radiodétection.

Dans certains cas particuliers, il n'est pas toujours possible d'observer toutes ces règles, mais toute dérogation éventuelle devrait être précédée d'une étude minutieuse.

5. Critères de brouillage

Dans certains cas, les critères de brouillage devront être déterminés par des essais. Toutefois, lorsqu'il s'agit de faisceaux hertziens en visibilité directe utilisant des bandes partagées, on aura recours aux Avis du CCIR. Il n'est pas possible de donner des directives générales pour les brouillages par radiodétection et d'autres types de brouillage; ceux-ci devront être déterminés par voie d'expérimentation.

6. Facteurs géographiques

6.1 Bien que la station terrienne doive être favorablement située de manière à offrir la visibilité nécessaire de tous les satellites avec lesquels elle devra communiquer, on peut être amené à considérer les facteurs supplémentaires suivants lorsqu'on choisit l'emplacement le mieux approprié:

- les projets d'établissement de systèmes de Terre dans le voisinage, élaborés par l'administration du pays en cause ou par des administrations voisines (voir l'Avis 359, le Rapport 209 et les Actes finals de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, Genève, 1971);
- la proximité d'aéronefs volant bas, de couloirs d'approche, etc.;
- l'emplacement doit, de préférence, être entouré de collines assurant une protection contre les brouillages. Toutefois, pour que la visibilité du satellite soit aussi bonne que possible, les angles de site des obstacles ne doivent pas dépasser environ 3°;
- le sol ne doit pas avoir tendance à s'affaisser;
- l'emplacement peut devoir être propre à recevoir plusieurs antennes de grandes dimensions sans qu'il y ait d'obscurcissement mutuel;
- au voisinage immédiat des antennes, il faut éviter la présence de structures artificielles telles que les alimentations en énergie, et celle d'obstacles naturels (arbres, par exemple).

6.2 Les conditions atmosphériques peuvent avoir une influence importante sur le bruit résiduel d'un système du service fixe par satellite. A cet égard, l'idéal est un climat tempéré et sec, avec des vents de faible vitesse.

7. Facteurs logistiques

7.1 L'emplacement doit recevoir l'agrément des autorités locales et l'on doit avoir la possibilité, le cas échéant, d'imposer des servitudes aux terrains adjacents, concernant notamment la construction de bâtiments, pour que la station puisse être exploitée sans gêne.

7.2 Il peut être nécessaire d'établir une connexion avec le réseau de lignes métalliques ou de faisceaux hertziens et l'on doit alors considérer la distance au centre de commutation le plus proche.

7.3 Il faut voir s'il y a une source d'énergie, si l'alimentation en eau est adéquate et s'il y a des voies d'accès.

7.4 Pour pouvoir déterminer la position exacte de la station terrienne, on peut être amené à choisir un emplacement qui ait des points de triangulation visibles.

7.5 Une tour de collimation peut être nécessaire.

8. Facteurs de sécurité

8.1 Il y a lieu d'examiner les effets nocifs de rayonnements excessifs sur les êtres humains et les risques associés à la manutention de matières inflammables ou explosives. A titre indicatif, l'accès aux zones où la densité de rayonnement dépasse 10 mW/cm^2 doit être réglementé pendant la durée de fonctionnement de la station. Il ne faut à aucun moment y manutentionner des liquides inflammables ni y entreposer des dispositifs explosifs. Dans les zones où les gens sont exposés aux rayonnements en permanence, il peut être approprié d'adopter une densité de rayonnement plus faible.

8.2 Lorsque des aéronefs volant bas risquent d'être exposés aux dangers en question, leurs exploitants doivent avoir été dûment avisés de ce risque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PRESCOTT, H. [avril 1968] Some aspects of radar interference at earth stations. IEE Conf. Publ., 39. IEE Conference on Interference Problems Associated with the Operation of Microwave Communication Systems.

RAPPORT 554-2

UTILISATION D'UNE STATION TERRIENNE TRANSPORTABLE A PETITE ANTENNE POUR LES OPÉRATIONS DE SECOURS EN CAS DE CATASTROPHES NATURELLES ET DE SITUATIONS CRITIQUES ANALOGUES

(Question 22/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

La Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, Genève, 1971, a adopté la Recommandation N° Spa2 – 13 visant à planifier et organiser l'emploi des télécommunications par satellite dans les régions frappées par des catastrophes naturelles. On pense que le fait de disposer rapidement de communications sûres, immédiatement après une catastrophe naturelle, serait utile pour sauver des vies humaines en permettant de mieux coordonner les activités de secours.

Le présent Rapport traite de la structure et des caractéristiques de stations terriennes transportables par avion et destinées à être utilisées avec des satellites géostationnaires dans le service fixe par satellite.

Cette étude porte également sur les trajets suivants: types de modulation, largeur de bande requise, p.i.r.e. du satellite, p.i.r.e. de la station terrienne, caractéristiques du récepteur à faible bruit, caractéristiques de l'amplificateur à grande distance et paramètres du système d'antenne.

Les paramètres donnés ci-après sont, en règle générale, fondés sur l'hypothèse que les stations terriennes travailleront avec un répéteur de satellite à faisceau global. Si une station terrienne est appelée à ne travailler que dans les limites d'une région couverte par un faisceau modelé, ces paramètres pourront être assouplis.

2. Considérations générales

En cas de catastrophes naturelles, épidémies, famines, etc., l'impératif le plus urgent est de mettre en place une liaison de télécommunication sûre pour les opérations de secours. Pour établir cette liaison dans le service fixe par satellite, il est souhaitable de disposer d'une station terrienne mobile qui puisse être transportée et installée sur les lieux de la catastrophe et avoir accès à un système de télécommunication par satellite existant.

Pour établir un tel service, on peut utiliser tout système de télécommunication par satellite compatible avec les caractéristiques techniques de la station terrienne transportable.

2.1 *Capacité en voies requise*

La liaison de télécommunication pour les opérations de secours relie la région frappée par la catastrophe à des centres de secours spécialisés; la capacité de transmission requise doit être d'au moins six circuits téléphoniques (y compris une voie de téléimprimeur) et une voie de service.

2.2 *Qualité des circuits*

Les circuits établis pour les opérations de secours d'urgence ne doivent pas nécessairement avoir la haute qualité recommandée par le CCIR pour le service fixe par satellite. Un rapport signal/bruit pondéré équivalent d'environ 30 dB pour une voie téléphonique semble être de nature à permettre une intelligibilité acceptable de la parole, mais cette question demande à être étudiée plus avant.

2.3 *Choix de la bande de fréquences*

Des systèmes à satellite géostationnaire fonctionnent actuellement dans les bandes des 4 et 6 GHz; il est donc souhaitable, dans les conditions actuelles, d'utiliser ces bandes pour les opérations de secours.

Lorsqu'on dispose de satellites appropriés, il est préférable que les opérations de secours soient conduites dans des bandes qui ne sont pas en général utilisées en partage avec des services de Terre. Des bandes telles que 14/12 GHz et 30/20 GHz peuvent convenir dans certaines circonstances.

2.4 *Station terrienne associée*

La station terrienne transportable pourrait correspondre avec n'importe quelle station terrienne existante appropriée, à condition que celle-ci possède l'équipement voulu. Il faudrait que les stations terriennes appropriées soient identifiées, de façon qu'on puisse les pourvoir à l'avance de l'équipement supplémentaire.

3. Méthodes de modulation préférées

Pour le choix du type de modulation qui convient le mieux pour un système fonctionnant avec une station terrienne transportable, il faut tenir compte de la puissance limitée sur le trajet descendant et de la nécessité d'une certaine souplesse d'accès au système à satellites.

Parmi les divers types de modulation décrits dans les Rapports 509 et 708, une station de ce genre pourrait utiliser la modulation de fréquence avec multiplexage par répartition en fréquence, ou encore la MF avec une seule voie par porteuse, la modulation MIC-MDP, ou la modulation MDP delta.

La transmission à une seule voie par porteuse MIC-MDP a été déjà utilisée en service, par exemple dans le système SPADE, mais les deux autres systèmes à une seule voie par porteuse ne sont pas d'usage courant à l'échelon mondial. Cependant, les systèmes à modulation de fréquence à une seule voie avec compression-extension et ceux à modulation delta (MD-MDP) sont plus efficaces lorsque la puissance est limitée. On pourrait améliorer encore l'efficacité des systèmes en recourant à des méthodes de codage avec correction des erreurs par codage redondant, sans voie de retour.

Le Tableau I donne des exemples de la p.i.r.e. nécessaire pour les satellites et la station terrienne et de la largeur de bande pour ces méthodes de modulation. Il se peut que certaines des p.i.r.e. indiquées dans le Tableau I ne soient pas réalisables dans les systèmes à satellites actuellement en service. Il convient aussi d'observer que la qualité de transmission subjective de chacun des systèmes étudiés n'est pas nécessairement identique. Il est nécessaire de poursuivre les travaux à ce sujet.

4. Caractéristiques de la station terrienne transportable

4.1 *Rapport G/T du système*

Dans la bande des 4 GHz, il sera raisonnable de considérer comme objectif un rapport G/T compris entre 17,5 et 23,5 dB(K^{-1}), mais il convient de poursuivre les études sur ce point. En supposant qu'on ait un amplificateur paramétrique non refroidi (température de bruit 50 K) et que l'angle de site de l'antenne soit de 10°, on aurait des diamètres d'antenne compris entre 2,5 m et 5 m environ.

Dans la bande de 11 à 13 GHz, les températures de bruit type des récepteurs varient entre 100 K (amplificateur paramétrique) et 400 K (amplificateur FET). Avec des antennes ayant un diamètre d'environ 3 m, on pourrait atteindre un rapport G/T compris entre 19 et 25 dB(K^{-1}).

Dans la bande des 20 GHz, il sera raisonnable de considérer comme subjectif un rapport G/T compris entre 14,5 et 24,5 dB(K^{-1}). En supposant qu'on ait un amplificateur FET dont la température de bruit soit d'environ 750 K, ces valeurs correspondent à un diamètre d'antenne compris entre 1 m et 3 m environ.

4.2 *P.i.r.e. de la station terrienne*

La p.i.r.e. de la station terrienne dépend de la méthode de modulation, de la capacité en voies téléphoniques à l'émission et des caractéristiques du satellite.

Toutefois, dans le cas d'une exploitation sur plusieurs porteuses, comme c'est le cas de la transmission à une seule voie par porteuse (SCPC), la puissance maximale de sortie de l'émetteur doit être calculée, compte tenu d'une réduction du niveau au point de saturation, suffisante pour abaisser le bruit d'intermodulation à un niveau acceptable. Le Tableau I donne des valeurs typiques de la p.i.r.e. requise pour la station terrienne transportable.

TABLEAU I — *Exemples de paramètres de transmission pour un système fonctionnant dans les bandes de 6 et 4 GHz*

Rapport G/T dB(K^{-1}) (diamètre)	Type de modulation	Largeur de bande par porteuse	p.i.r.e. du satellite par porteuse	p.i.r.e. de la station terrienne par porteuse	Puissance d'émission de la station terrienne par porteuse	Facteurs de qualité des circuits (par temps clair)
17,5 (2,5 m)	MRF-MF (pour 6 voies)	250 kHz	14 dBW	57,5 dBW	45 W	S/N 30 dB
	SCPC 64 kbit/s MIC-MDP quadrivalente	45 kHz	11 dBW	54,5 dBW	22 W	Taux d'erreur sur les bits: 10^{-4}
	SCPC 32 kbit/s MΔ-MDP bivalente	45 kHz	5 dBW	48,5 dBW	5,6 W	Taux d'erreur sur les bits: 10^{-3}
	SCPC-MF avec compression-extension	30 kHz	1 dBW	44,5 dBW	2,2 W	S/N 22 dB (sans compression-extension)
23,5 (5 m)	MRF-MF (pour 6 voies)	250 kHz	8 dBW	57,5 dBW	11 W	S/N 30 dB
	SCPC 64 kbit/s MIC-MDP quadrivalente	45 kHz	5 dBW	54,5 dBW	5,6 W	Taux d'erreur sur les bits: 10^{-4}
	SCPC 32 kbit/s MΔ-MDP bivalente	45 kHz	− 1 dBW	48,5 dBW	1,4 W	Taux d'erreur sur les bits: 10^{-3}
	SCPC-MF avec compression-extension	30 kHz	− 5 dBW	44,5 dBW	0,6 W	S/N 22 dB (sans compression-extension)

Note 1. — On admet que, dans un système MRF-MF et dans les systèmes à une seule voie par porteuse avec compresseur-extenseur, on utilise un démodulateur à abaissement de seuil.

Note 2. — Les valeurs indiquées, pour les p.i.r.e. du satellite et de la station terrienne, correspondent à une petite station terrienne dont l'angle de site de l'antenne est 10°, à l'exclusion de toute marge. Le facteur de qualité des stations terriennes, avec lesquelles communique la petite station terrienne, est G/T = 40.7 dB(K^{-1}).

Note 3. — Les caractéristiques du répéteur du satellite sont similaires à celles du répéteur à couverture globale d'INTELSAT-IV. On admet que le gain du répéteur est tel que la différence entre la p.i.r.e. de la station terrienne et la p.i.r.e. correspondante du satellite est de 65 dB.

5. Constitution de la station terrienne transportable

La station terrienne comprend les principaux sous-systèmes suivants:

- antenne;
- amplificateur de puissance;
- récepteur à faible bruit;
- équipement de communication avec le sol;
- équipement de commande et de contrôle;
- équipement terminal, y compris les téléimprimeurs et les téléphones;
- équipement auxiliaire.

5.1 *Poids et dimensions*

Tout l'équipement, y compris les abris, devrait pouvoir se diviser en éléments ayant un poids tel qu'ils puissent être manipulés par un petit nombre de personnes. En outre, l'encombrement total et le poids total devraient être limités de façon que l'équipement puisse être transporté dans la soute à bagages d'un avion à réaction pour passagers, tel que le Boeing B707 (poids admissible 7000 kg) ou le Douglas DC8-62 (poids admissible 10 000 kg). Dans l'état actuel de la technique, ces limites sont faciles à respecter.

5.2 *Antenne*

La forme et la taille de l'antenne sont déterminées par le gain et la température de bruit requis. D'autres facteurs tels que les conditions climatiques, le poids maximal et la facilité d'acquisition et de poursuite du satellite sont aussi à considérer.

L'une des conditions principales à remplir par l'antenne est la facilité de montage et de transport. A cet effet, on pourrait composer le réflecteur de l'antenne de plusieurs fuseaux d'un matériau léger, par exemple une matière plastique armée de fibres ou un alliage d'aluminium. On a prévu d'utiliser une antenne d'un diamètre compris entre 2,5 et 6 m.

Le réflecteur principal de l'antenne pourrait être éclairé par un cornet à alimentation par l'avant ou par un dispositif d'alimentation comprenant un réflecteur secondaire. Il semble que ce dernier type soit un peu plus avantageux pour le rapport G/T, parce que l'on peut optimiser la courbure du réflecteur secondaire et celle du réflecteur principal, mais il peut se faire que la facilité de montage et d'alignement soit plus importante qu'un rapport G/T élevé.

On pourrait réaliser un dispositif de pointage manuel ou automatique qui soit adapté au poids et à la consommation de puissance, avec une portée angulaire de $\pm 5^\circ$ environ, l'information de pointage étant fournie par un signal émis par le satellite sur la porteuse.

5.3 *Amplificateur de puissance*

Comme amplificateur, le klystron à refroidissement par air et les amplificateurs à tube à ondes progressives (type hélicoïdal) conviennent les uns et les autres à cette application, mais, du point de vue du rendement et de la facilité de maintenance, c'est le premier qui est préférable.

Bien que la largeur de bande de transmission instantanée soit petite, on pourra être amené à prévoir une large gamme d'accord de l'amplificateur de sortie, par exemple 500 MHz, puisque la voie disponible du satellite peut se trouver à un endroit quelconque de cette bande.

Dans la bande des 30 GHz, l'IMPATT, le TOP et le klystron conviennent à cette application.

Les puissances de sortie requises sont indiquées, à titre d'exemples, dans le Tableau I.

5.4 *Récepteur à faible bruit*

Comme ce récepteur doit être petit, léger, facile à manutentionner et nécessite peu de maintenance, c'est un amplificateur paramétrique non refroidi qui convient le mieux.

D'année en année, on améliore la température de bruit de ce type de récepteur. On l'a abaissée à 50 K, et on escompte atteindre une température encore plus basse à l'avenir, dans la bande des 4 GHz. Un amplificateur FET convient mieux du point de vue de la dimension, du poids et de la consommation d'énergie qu'un amplificateur paramétrique, mais sa température de bruit est plus élevée. Une température de bruit de 100 K dans la bande des 4 GHz et de 400 K dans celle des 12 GHz a été obtenue avec des amplificateurs FET. Dans la bande des 20 GHz, une température de bruit de 750 K a été obtenue avec un amplificateur FET et on espère atteindre à l'avenir une température de bruit inférieure à 300 K.

6. Exemples de petites stations terriennes transportables

Dans la bande des 6/4 GHz, un certain nombre de stations terriennes transportables fonctionnent maintenant avec divers diamètres d'antenne. Dans la bande des 14/12 GHz, la plupart des stations transportables ont des antennes d'un diamètre de 3 m environ.

6.1 *Exemple de petite station terrienne transportable destinée à fonctionner à 6/4 GHz*

Une station terrienne pouvant être aéroportée ou transportée par un camion de 8 tonnes a été construite selon les principes énoncés au § 5; elle a fonctionné de façon satisfaisante [Okamoto et autres, 1977].

Cette station est équipée d'une antenne de 3 m de diamètre, sa p.i.r.e. est d'environ 66 dBW et la valeur du rapport G/T est, dans son cas, de quelque 20 dB(K^{-1}). Elle pèse en tout 5,5 tonnes. L'énergie électrique nécessaire aux besoins, y compris la climatisation, est de 7,5 kVA. Le réflecteur se compose de 7 parties dont chacune pèse 20 kg et que 3 personnes peuvent assembler en 2 heures environ. La station emploie la modulation MRF-MF. Sa capacité est de 6 voies bidirectionnelles, avec un répéteur similaire au répéteur à faisceau global Intelsat-IVA, ou de 60 voies bidirectionnelles, avec un répéteur à faisceau modelé similaire au répéteur japonais CSE (satellite expérimental de télécommunications), le rapport signal/bruit dans une voie étant de quelque 43 dB.

6.2 *Exemples de petites stations terriennes transportables destinées à fonctionner à 30/20 GHz*

Deux types de petites stations terriennes fonctionnant à 30/20 GHz et pouvant être transportées par un camion ou un hélicoptère ont été construites et ont fonctionné d'une manière satisfaisante [Saruwatari et autres, 1978; Egami et autres, 1980].

L'une de ces stations est équipée d'une antenne Cassegrain de 2,7 m de diamètre. Le poids total de la station est de 5,8 tonnes et la puissance requise est de 12 kVA. La p.i.r.e. maximale est d'environ 76 dBW et le rapport G/T est d'environ 27 dB(K^{-1}) par temps clair. La station utilise la modulation MRF-MF et a une capacité de transmission de 132 voies téléphoniques bidirectionnelles. La durée de montage est d'environ une heure après l'arrivée de l'équipement.

L'autre station est une station SCPC munie d'une antenne Cassegrain de 2 m de diamètre. La p.i.r.e. maximale est d'environ 56,3 dBW et le rapport G/T est d'environ 20,4 dB(K^{-1}) par temps clair. La station utilise un système adaptif à modulation delta MDPQ-SCPC et a une capacité de transmission d'une voie téléphonique bidirectionnelle.

7. Conclusions

Une station terrienne transportable utilisée avec un système à satellites existant permet d'établir rapidement un service de télécommunication fiable pour aider aux opérations de secours en cas de catastrophes naturelles ou de situations critiques analogues.

Pour la disposition définitive de la station, un complément d'étude devrait porter sur les sujets suivants:

- détermination de valeurs acceptables pour le rapport signal/bruit (analogique) ou pour les taux d'erreur équivalent (numérique) dans une voie téléphonique, et du taux d'erreur dans une voie de télégraphie;
- conséquences, sur le plan technique, des brouillages mutuels entre la station terrienne transportable, d'une part, et les faisceaux hertziens et/ou d'autres systèmes à satellites, d'autre part;
- aspects logitisques du transport, de l'installation et de l'exploitation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

EGAMI, S., OKAMOTO, T. et FUKETA, H. [février 1980] K-band mobile earth station for domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, **2**, 291-294.

OKAMOTO, T., EGAMI, S. et OGUCHI, M. [juillet 1977] Small transportable earth station for satellite communication. *Japan Telecomm. Rev.*, Vol. 19, **3**, 230-234.

SARUWATARI, T., TSUKAMOTO, K., YOKOYAMA, M. et SASAOKA, S. [octobre 1978] Digital transmission experiments with the CS satellite. 4th International Conference on Digital Satellite Communications, Montreal, Canada, 283-290.

RAPPORT 869

STATIONS TERRIENNES DE FAIBLE CAPACITÉ ET SYSTÈMES A SATELLITES CORRESPONDANTS DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 23/4)

(1982)

1. Introduction

Par sa Résolution N° 18, la Conférence de plénipotentiaires de l'UIT (Torremolinos, 1973) charge le CCIR de procéder d'urgence aux études des aspects techniques et opérationnels de la mise au point de stations terriennes de faible capacité, et des systèmes à satellites associés, afin d'aider les pays en développement et les différentes administrations à les utiliser. Par la suite, le CCIR a adopté la Question 23/4 sur ce sujet. Les progrès actuels de la technologie des télécommunications par satellite peuvent fournir aux pays en développement les moyens de mettre en place des réseaux de télécommunication répondant à leurs besoins.

Ces pays ont besoin, au premier chef, d'un système pouvant desservir un grand nombre de petites localités, très dispersées, et ne devant donner lieu qu'à un petit volume de trafic. Chaque localité a donc besoin d'une station terrienne économique, facile à installer et à entretenir, équipée pour une ou plusieurs voies téléphoniques. Le secteur spatial doit desservir simultanément un assez grand nombre de ces stations terriennes, selon des normes de qualité et de fiabilité appropriées.

Ce qui précède peut être considéré comme une définition large du type de système de faible capacité étudié dans le présent Rapport. La zone géographique desservie par un tel système peut être de nature nationale ou régionale, des installations étant prévues pour l'accès aux réseaux de télécommunication nationaux ou internationaux existants.

Le présent Rapport porte sur certains des facteurs techniques et opérationnels à prendre en compte et donne, dans les Annexes, des exemples de paramètres possibles du système, pour répondre à la Question 23/4.

2. Caractéristiques du système

Ce système de faible capacité devrait avoir les caractéristiques suivantes:

- quelques circuits téléphoniques à la plupart des emplacements et jusqu'à 12 circuits téléphoniques en quelques emplacements;
- caractéristiques de circuit compatibles avec celles des services télex, de transmission de données à faible débit et autres services;
- possibilité d'établir des circuits du type conférence pour répondre à des besoins particuliers (santé, éducation, etc.);
- être compatible avec les réseaux existants pour ce qui concerne:
  - la signalisation entre dispositifs de commutation, et
  - la caractéristique de bruit;
- l'ensemble du système, y compris le trajet de propagation, doit présenter un niveau acceptable de qualité, de fiabilité et de disponibilité;
- options de réception des programmes de télévision et de radiodiffusion.

Du point de vue de la conception et de l'exploitation, un système de faible capacité présenterait notamment les caractéristiques suivantes:

- coût modéré, même au détriment d'une moindre qualité;
- facilité de transport, d'installation et de maintenance;
- faible consommation d'énergie des équipements de stations terriennes;
- aptitude à faire fonctionner des stations terriennes dans des contextes climatiques très divers;
- utilisation de techniques de modulation simples et efficaces;
- emploi de systèmes d'accès multiple simples et efficaces;
- fiabilité élevée des équipements des stations terriennes.

Les paragraphes suivants du présent Rapport examinent les facteurs affectant les manières dont il est possible de satisfaire à ces exigences.

3. Bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite

Un certain nombre de bandes de fréquences sont attribuées au service fixe par satellite dans les Actes finals de la CAMR-79. Il s'agit notamment des bandes 2,5 GHz, 4 GHz, 11 GHz, 12 GHz et 20 GHz pour le sens espace vers Terre, et des bandes 2,5 GHz, 6 GHz, 12 à 13 GHz, 14 GHz et 30 GHz pour le sens Terre vers espace.

Dans le choix d'une bande de fréquences, on doit tenir compte des facteurs suivants:

- partage avec d'autres services;
- aspects économiques du système, notamment le meilleur compromis entre le coût du secteur spatial et celui du secteur terrien;
- facteurs d'environnement, par exemple propagation et charges dues au vent.

3.1 *Bande 2,5 GHz*

La bande 2,5 GHz est extrêmement étroite: 190 MHz de large dans la Région 2 et seulement 35 MHz dans la Région 3; elle ne contient aucune attribution dans la Région 1. On dispose aussi, à 2,5 GHz, de plusieurs bandes de 35 MHz pour les liaisons montantes, dans les Régions 2 et 3. Pour cette raison, la capacité maximale des systèmes devant fonctionner dans cette bande 2,5 GHz est très limitée. Il est nécessaire de prévoir un partage avec le service de radiodiffusion par satellite et avec les services fixe et mobile de Terre. On impose des limites à la puissance surfacique pour pouvoir réglementer ce partage. Il pourra être difficile de faire un compromis rentable entre le coût du secteur spatial et celui du secteur terrien, si on envisage d'utiliser un grand nombre de stations terriennes.

3.2 *Bande 6/4 GHz*

Cette bande est celle qui est la plus utilisée jusqu'à présent; on y a recours pour des systèmes internationaux et nationaux de téléphonie et de transmission de données à grande densité de trafic et à faible densité de trafic, et pour la distribution de programme de radiodiffusion sonore et de télévision. Il est nécessaire de prévoir le partage avec les services fixe et mobile de Terre. Pour cette raison, on impose des limites à la puissance surfacique et il faut souvent effectuer une coordination avec les systèmes existants de faisceaux hertziens hyperfréquences. Du fait de cette large utilisation de la bande 6/4 GHz, les sous-systèmes nécessaires sont au point et faciles à obtenir dans le commerce.

Si l'on veut pouvoir utiliser largement cette bande de fréquences dans le service fixe par satellite, on devra normalement effectuer une coordination des autres systèmes qui feront usage de l'orbite des satellites géostationnaires. A long terme, cela pourra exiger des types de systèmes permettant une utilisation plus efficace de cette orbite, particulièrement en cas d'encombrement de celle-ci.

Le fonctionnement en présence de fortes précipitations ne pose pas de problèmes sérieux dans la bande 6/4 GHz (voir les Rapports 382 et 866).

3.3 *Bandes des 14, 11, 12 et 13 GHz*

Les attributions qui ont été décidées par la CAMR-79 pour ces bandes de fréquences sont plus complexes. La bande 10,7 à 11,7 GHz est attribuée dans le monde entier pour les transmissions espace vers Terre, moyennant des limites de puissance surfacique pour permettre le partage avec les services fixe et mobile.

La bande 11,7 à 12,1 GHz et une partie de la bande 12,1 à 12,3 GHz sont attribuées au SFS dans la Région 2, sans limitation de puissance surfacique. Cette absence de limitation facilite l'emploi de petites antennes de stations terriennes.

La bande 12,2 à 12,75 GHz en Région 3 et la bande 12,5 à 12,75 GHz en Région 1 sont attribuées au SFS (espace vers Terre). Des restrictions sont imposées à la puissance surfacique dans ces bandes.

Il est probable que les bandes qui seront attribuées pour les liaisons Terre vers espace correspondantes seront la bande 12,75 à 13,25 GHz et la bande 14,0 à 14,5 GHz.

Le partage avec les services fixe et mobile est nécessaire dans ces bandes, sauf dans certaines parties de la Région 2. Toutefois, il existe de nombreuses zones où des systèmes de ce genre ne seront pas employés; cela réduira les difficultés de coordination et permettra peut-être d'éviter que la plupart des stations terriennes soient intallées en des points malcommodes.

L'affaiblissement de propagation dans les cellules de fortes précipitations impose des contraintes supplémentaires à la conception des systèmes dans ces bandes de fréquences, surtout dans les zones à très forte pluviométrie (voir les Rapports 382 et 866). On peut compenser ces effets de diverses manières: en choisissant des stations terriennes à grandes valeurs de G/T, en choisissant des stations spatiales à p.i.r.e. élevée ou en réalisant le système avec des performances moins bonnes que celles requises pour les liaisons internationales.

A ces fréquences plus élevées, on peut utiliser des antennes de plus petit diamètre pour obtenir des valeurs de G/T similaires à celles que l'on obtient aux fréquences moins élevées. Cette possibilité de réduire le diamètre d'antenne est de nature à abaisser le prix d'achat du matériel et les coûts d'installation.

Dans cette bande de fréquences, l'équipement est moins largement utilisé que dans la bande 6/4 GHz, mais on commence à pouvoir se le procurer facilement à des prix compétitifs, grâce à la mise en œuvre de plusieurs systèmes à satellites, internationaux et nationaux dans la bande en question.

3.4 *Bande 30/20 GHz*

Il existe actuellement peu de systèmes opérationnels (spatiaux ou de Terre) dans cette bande, mais on met en place quelques systèmes expérimentaux. On a donc des raisons de penser que la coordination avec d'autres systèmes spatiaux et avec des systèmes des services fixe et mobile de Terre ne sera pas une opération complexe. Par contre, les possibilités d'approvisionnement en matériel fonctionnant dans ces bandes sont actuellement limitées.

En présence de fortes pluies, les affaiblissements de propagation sont nettement plus importants à 30/20 GHz qu'à 14/(11 et 12) GHz. Pour la plupart des systèmes de transmission, on pourra être amené à appliquer la régulation de puissance sur les trajets montants ou à recourir à la réception avec diversité d'emplacement.

3.5 *Résumé des considérations sur le choix de la bande de fréquences*

A l'heure actuelle, il semble que les bandes de fréquences les plus intéressantes pour les types de systèmes qui nous occupent sont la bande 6/4 GHz et les bandes 14/(11 et 12) GHz. Il faudra reconnaître plus en détail les caractéristiques et l'environnement des systèmes pour pouvoir faire un choix définitif entre ces deux possibilités.

4. Propagation

Les effets de la pluie sur la propagation radioélectrique revêtent une importance particulière dans le cas de circuits par satellite, du fait que ces effets commencent à être perceptibles à partir d'environ 4 GHz selon l'intensité des précipitations et la longueur du trajet de propagation à travers la pluie. Ces effets peuvent être classés comme suit:

- affaiblissement,
- dépolarisation,
- diffusion.

Chacun de ces facteurs a une importance considérable pour les opérations de planification des fréquences. Le problème fondamental posé par la pluie est généralement celui de la dépolarisation des émissions au-dessous de 10 GHz, et un affaiblissement important au-dessus de 10 GHz. Prenons par exemple le cas de la bande 6/4 GHz, dans laquelle les satellites fonctionnent avec réutilisation des fréquences au moyen de la polarisation orthogonale, ce qui tend à devenir le mode de fonctionnement normal: dans ces conditions, le découplage de polarisations croisées peut s'abaisser de sa valeur nominale (30 dB) jusqu'à une valeur parfois aussi faible que 12 à 15 dB par fortes pluies. Il faut porter dûment attention à ce facteur au stade de la conception du système. Pour se faire une idée de l'affaiblissement dû à une pluie intense, il suffit de se reporter au Rapport 721 où il est dit qu'un taux de précipitation de 60 mm/h donne lieu à un affaiblissement de 3 dB/km à 13,5 GHz et à un affaiblissement de 0,3 dB/km à 6 GHz. Cependant, des taux de précipitation aussi élevés se rencontrent rarement sous la plupart des latitudes, et généralement pour des cellules de pluie horizontales de dimensions limitées. Cela signifie premièrement, que même dans les régions à climat tropical où les taux de précipitation sont les plus élevés, il ne sera nécessaire de prévoir un niveau maximum d'affaiblissement que si l'on exige une très haute disponibilité des liaisons et, deuxièmement, qu'il est probable que de tels taux de précipitation ne toucheront qu'une seule station ou un très petit nombre de stations d'un réseau donné en même temps.

Les caractéristiques des précipitations varient considérablement selon les régions du monde, et il convient de se reporter au Rapport 563 qui fournit des renseignements généraux à ce sujet. On notera cependant que les valeurs des précipitations mesurées localement constituent la meilleure base pour la planification des systèmes car les valeurs indiquées dans le Rapport 563, calculées pour le monde entier, ne peuvent pas tenir compte des variations locales.

Il serait faux de penser que des précipitations intenses constituent un obstacle insurmontable à l'utilisation de fréquences élevées (de plus de 10 GHz, par exemple), mais il importe de se rendre compte que la planification efficace d'un réseau à satellite exige un examen très attentif des taux de précipitation aux emplacements prévus pour l'implantation des stations terriennes. Un tel examen peut permettre de repérer distinctement les zones (normalement peu nombreuses) où la pluie risque de poser des difficultés et de prendre les mesures qui s'imposent lors de la planification du système. Par exemple, on pourrait concevoir des systèmes ayant des valeurs de disponibilité analogues à celles observées pour les services existants de Terre dans des pays où la mise en service de systèmes à satellites de faible capacité est envisagée. Des spécifications moins rigides en matière de disponibilité des liaisons rendraient possible l'utilisation de bandes de fréquences comprises entre 10 et 15 GHz avec des marges de même ordre que celles qui sont nécessaires pour les bandes des 6/4 GHz.

5. Méthodes de modulation et d'accès multiple

Pour des raisons d'économie, on sera généralement amené à donner aux stations terriennes de faible capacité un rapport G/T peu élevé. Les liaisons par satellite pour de telles stations seront du type à limitation de puissance et l'utilisation efficace de la puissance par voie rayonnée par le satellite serait un facteur important dans le choix de la méthode de modulation pour les systèmes à faible capacité. Des méthodes de modulation n'exigeant qu'une faible valeur du rapport C/N_0 sont donc préférables. D'autres facteurs qu'il est important de considérer pour ce qui est du choix de la méthode de modulation pour les systèmes de faible capacité sont: la capacité en voies, l'efficacité de l'utilisation du spectre des fréquences, la souplesse dans l'interconnexion, l'interface avec le réseau de Terre, la nécessité éventuelle de l'interconnexion avec le réseau international, des coûts d'investissement peu élevés, la facilité d'installation et de maintenance, etc.

Parmi les techniques d'accès multiple et les méthodes de modulation utilisables dans le service fixe par satellite qui sont décrites dans le Rapport 708, il apparaît que les suivantes sont actuellement les plus indiquées pour les systèmes de faible capacité:

- MRF-MF-AMRF,
- SCPC: MIC-MDP ou MΔ-MDP ou MF avec compression-extension syllabique.

La MRF-MF-AMRF est la méthode classique couramment utilisée dans le service fixe par satellite. Cependant, pour un petit nombre de voies, elle fonctionnerait avec préassignation, de sorte que la puissance du satellite et la largeur de bande ne font pas l'objet d'une utilisation efficace si les taux d'appel sont faibles.

Le fonctionnement à une seule voie par porteuse (SCPC) est séduisant pour des systèmes à faible capacité car il donne lieu à une grande souplesse jointe à une économie en matière de puissance et de largeur de bande du satellite. Les principaux avantages des systèmes SCPC sont les suivants:

- ils permettent d'employer des porteuses commandées par la voix, ce qui économise la puissance de satellite;
- ils ne comportent pas d'équipement de multiplexage à l'emplacement où la station terrienne peut être installée ou à proximité du central local;
- on peut y ajouter des voies une par une;
- souplesse de transmission, puisque chaque voie est établie sur une porteuse separée;
- l'assignation en fonction de la demande est assurée par des techniques à une seule voie par porteuse.

Le choix d'une technique de modulation pour les systèmes à une seule voie par porteuse s'arrête parfois sur la modulation en fréquence avec compresseurs-extenseurs et accentuation et parfois sur un système numérique tel que la modulation delta ou le MIC. Il est impossible, à l'heure actuelle, d'émettre un avis général en faveur de l'une ou de l'autre et le choix dépendra des facteurs particuliers à prendre en considération pour telle ou telle application (coût de l'équipement, personnel de maintenance disponible, besoins des services de transmission de données, conditions de brouillage, etc.).

Les paramètres de transmission des différentes méthodes de modulation sont indiqués au Tableau I, dont les données permettent de conclure que la modulation delta à 32 kbit/s et la MF-SCPC à compression-extension syllabique présentent des avantages par rapport aux autres solutions.

TABLEAU I – *Exemples de paramètres de transmission pour diverses méthodes de modulation*

Type de modulation	Qualité du circuit	Rapport, nominal C/N_0 nécessaire (dB(Hz))	Largeur de bande de bruit par porteuse
MRF-MF (pour 12 voies)	S/N = 50 dB	74	1,15 MHz
SCPC 64 kbit/s MIC-MDP quadrivalente	Taux d'erreurs sur les bits 1×10^{-5}	61	38 kHz
SCPC 32 kbit/s MD-MDP bivalente	Taux d'erreurs sur les bits 1×10^{-4}	56	38 kHz
SCPC-MF avec compression-extension	S/N = 50 dB (avec compresseurs-extenseurs)	55	25 kHz

5.1 *Accès multiple avec assignation en fonction de la demande (AMAD)*

Les circuits par satellite peuvent servir à établir des liaisons téléphoniques entre stations terriennes rurales, et ce de deux manières: assignation permanente et assignation en fonction de la demande pour accès multiple. Un circuit à assignation permanente relie «en permanence» l'équipement interurbain d'une station terrienne avec le même équipement d'une autre station. En revanche, un circuit ADAM est établi entre deux stations terriennes uniquement lorsque cela est nécessaire pour mettre en communication deux de ces stations.

Tout système qui assigne des circuits à satellite en fonction de la demande utilisera les circuits et l'équipement d'accès par modulation plus efficacement que si les circuits étaient assignés en permanence.

Il existe deux types de commande d'assignation en fonction de la demande. L'une est la commande répartie pour laquelle les différentes stations terriennes sont pourvues d'équipements de commande d'égale complexité. Le système SPADE utilise ce type d'assignation en fonction de la demande. L'autre type est la commande centralisée, dans laquelle seule la station centrale dispose d'un équipement de commande complexe, ce qui permet la conception simple des stations terriennes de faible capacité. Dans ce cas, il faut une voie de signalisation bidirectionnelle pour l'émission et la réception du signal de commande d'assignation. On peut obtenir une voie pour signalisation commune en utilisant une porteuse séparée, avec exploitation AMRT ou AMRF. Cette configuration donne à la commande une grande souplesse mais nécessite un équipement assez complexe. En appliquant la méthode de l'accès aléatoire (transmission aléatoire de paquets, notamment), on peut simplifier l'équipement.

6. Considérations relatives aux brouillages

Les systèmes du service fixe par satellite utilisent en partage des bandes de fréquences avec les services de Terre ainsi qu'avec d'autres réseaux à satellite; c'est pourquoi l'utilisation en partage des bandes donne lieu à deux situations fondamentales de brouillage:

- brouillages mutuels avec les services de Terre,
- brouillages mutuels avec les autres réseaux à satellite.

Pour faciliter le partage avec les services de Terre, le Règlement des radiocommunications impose des limites à la p.i.r.e. de la station terrienne vers l'horizon et à la puissance surfacique de la station spatiale à la surface de la Terre. Ces limites sont indiquées dans les articles 27 et 28.

Pour améliorer l'utilisation du spectre et l'orbite ainsi que le partage entre les réseaux des services spatiaux, l'article 29 impose des conditions strictes à la précision du maintien en position du satellite et à la précision de pointage du faisceau de l'antenne. L'article 29 contient aussi une disposition qui vise à réduire au minimum la p.i.r.e. émise par une station terrienne en dehors de l'axe du faisceau principal, en direction de l'orbite des satellites géostationnaires et des dispositions qui se rapportent à la protection contre les brouillages causés aux systèmes géostationnaires du service fixe par satellite par les systèmes spatiaux non géostationnaires.

6.1 *Brouillage entre les réseaux*

Le Rapport 455 mentionne les principaux éléments influant sur ce partage entre les réseaux du service fixe par satellite.

L'élément fondamental qui limite les possiblités de partage est le brouillage. Le brouillage dégrade la qualité de fonctionnement des systèmes et la mesure de cette dégradation dépend du type de modulation. Par exemple, dans les liaisons de téléphonie analogique, la dégradation se mesure en picowatts supplémentaires de bruit introduit dans une voie téléphonique; dans le cas des signaux numériques, la dégradation se mesure comme une augmentation du taux d'erreur sur les bits dans le détecteur. Dans tous les cas, la conséquence du brouillage en ce qui concerne la conception d'un système est qu'il faut prévoir des marges de fonctionnement plus grandes.

Une étude générale du brouillage entre réseaux figurant dans plusieurs documents du CCIR (en particulier dans les Avis 466, 483, 523, 524 et les Rapports 453, 454 et 455), seuls seront mentionnés ici les facteurs intéressant spécifiquement les systèmes de faible capacité.

La sensibilité et le gain de transfert élevés d'un satellite destiné à assurer les communications vers une zone de couverture de faibles dimensions permet de réduire la p.i.r.e. des stations terriennes correspondantes, ce qui tend à réduire le niveau de brouillage sur la liaison montante vers des satellites à grande couverture d'autres systèmes. Le gain élevé de l'antenne de réception du satellite dans de tels réseaux peut le rendre plus sensible au brouillage causé par des stations terriennes d'autres systèmes fonctionnant dans la même zone de service; on peut toutefois corriger la situation en réduisant effectivement le gain de l'antenne du satellite à l'extérieur de la zone de couverture.

Si l'on utilise une petite antenne de station terrienne pour émettre en direction d'une antenne de réception de satellite à grande couverture, l'émetteur devra avoir une puissance d'émission plus élevée pour compenser le faible gain de l'antenne. En conséquence, la densité spectrale de la p.i.r.e. en direction des autres satellites tendra à être élevée, ce qui aura pour effet d'augmenter l'espacement orbital minimal admissible entre le satellite considéré et les autres satellites couvrant le même territoire. Dans ce cas, il peut être nécessaire de recourir à un niveau d'émission de plus grande qualité dans les lobes latéraux, ou d'envisager l'emploi d'une plus grande antenne, du fait que les limites spécifiées dans l'Avis 524 sont applicables.

La p.i.r.e. intrinsèquement élevée sur les liaisons descendantes d'un réseau national à satellite augmente en général le brouillage dans une station terriene du service international. Le brouillage entre réseaux de ce type peut devenir plus grave lorsque s'accentue la disparité entre les zones de couverture des deux systèmes; ce problème de brouillage entre systèmes dont les caractéristiques sont très différentes (inhomogénéité) est examiné dans le Rapport 453. Dans ce cas, il convient d'appliquer les limites spécifiées dans l'Avis 358 pour la puissance surfacique.

En général, plus le rapport D/λ de l'antenne de la station terrienne est petit, plus il sera difficile de résoudre les problèmes de brouillage vis-à-vis du satellite adjacent fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences et dans la même zone de service. Cependant, la coordination pourra permettre de résoudre ces problèmes.

6.2 *Brouillage avec des faisceaux hertziens de Terre*

Lorsque les systèmes de télécommunications par satellite et les faisceaux hertziens de Terre fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences, cela pose des problèmes de brouillage mutuels. On notera cependant que, pour le type de réseaux considérés dans le présent Rapport, ce problème ne sera pas forcément difficile; en effet, dans les zones où il s'agira d'implanter les petites stations, il n'y aura pas toujours de grands réseaux de faisceaux hertziens de Terre. En revanche, dans les cas où les stations terriennes seront implantées au voisinage de ces faisceaux hertziens, il faudra tenir compte des brouillages mutuels.

Les mécanismes de brouillage sont de quatre types, mais seulement deux de ces mécanismes concernent la coordination avec les systèmes terrestres. Il s'agit de:

- émetteur de la station terrienne → récepteur de faisceaux hertziens,
- émetteur de faisceaux hertziens → récepteur de la station terrienne.

Le CCIR fixe le niveau tolérable de brouillage dans ses Avis 356, 558 et 357. Afin de maintenir le niveau réel de brouillage dans les réseaux de Terre au-dessous des valeurs tolérables maximales recommandées par le CCIR, l'Article 28 du Règlement des radiocommunications impose des limites aux émissions des stations terriennes et aux émissions des satellites. En outre, l'Article 27 du Règlement des radiocommunications impose des restrictions à la p.i.r.e. de la station de Terre et à la puissance d'émission afin de maintenir le brouillage causé aux réseaux spatiaux au-dessous des limites recommandées par le CCIR.

Il est possible de faire jouer plusieurs facteurs pour réduire le niveau de brouillage mutuel entre les réseaux à satellite et les réseaux de Terre. En voici quelques exemples:

- *Utilisation d'antennes à faisceau ponctuel*

  Sur les liaisons montantes et descendantes, l'utilisation d'antennes à faisceau ponctuel permet en général de supprimer les brouillages causés par la station terrienne à la station de Terre, car la p.i.r.e. requise de la station terrienne diminue à cause d'une amélioration de la sensibilité du satellite.

– *Utilisation des caractéristiques topographiques, des bâtiments, etc.*

Une augmentation des distances ainsi que la présence de bâtiments, etc., qui bloquent la propagation des ondes radioélectriques entre systèmes, constituent les moyens les plus élémentaires de supprimer les brouillages avec le système de Terre. Les montagnes et les collines sont utiles à cette fin. En ce qui concerne les zones urbaines, l'expérience montre que les bâtiments situés sur le trajet des ondes brouilleuses peuvent contribuer à réduire sensiblement les brouillages (voir les Rapports 390 et 382).

– *Divers*

Lorsque les caractéristiques géographiques du terrain, des bâtiments, etc., ne permettent pas de pallier les problèmes de brouillage, on peut atténuer leurs conséquences en installant devant une petite antenne proprement dite un écran d'antenne fait de métal ou de maille de fer et de matériaux absorbant les ondes radioélectriques.

Comme on l'a vu plus haut, une sélection soigneuse de l'emplacement ainsi que l'adoption de mesures appropriées de lutte contre le brouillage permettront le partage mutuellement avantageux de la bande de fréquences entre un système national de communications par satellite, composé de petites stations terriennes et un système de Terre.

7. Caractéristiques des stations terriennes

7.1 *Généralités*

Une station terrienne doit être la plus simple possible, avoir une consommation minimale en énergie primaire et l'antenne la plus petite possible compatible avec les caractéristiques du système. On pourrait réduire le coût d'installation de la station terrienne en ayant recours aux infrastructures existantes, par exemple en plaçant la station dans un bâtiment existant (bâtiment d'un central téléphonique rural). Une autre possibilité de réduire le prix de revient du système est d'éliminer les liaisons de connexion au réseau de Terre, si cela est possible.

On suppose que la plupart des zones qui seront desservies par un tel système ne sont pas électrifiées en permanence. Une faible consommation d'énergie primaire est donc l'un des principaux impératifs de conception pour que la station puisse être alimentée par une petite batterie chargée au moyen de panneaux solaires ou de toute autre source disponible.

7.2 *Antenne de la station terrienne*

Les dimensions de l'antenne doivent résulter d'un compromis entre les facteurs mécaniques tels que la masse, l'influence du vent, les pertes dues aux erreurs de pointage, le brouillage entre les systèmes, la capacité du système et d'autres facteurs tels que les diagrammes des lobes et le gain. En ce qui concerne les premiers facteurs (masse, vent et erreurs de pointage) et compte tenu de la nécessité de normaliser un modèle qui soit stable mais qui n'exige pas trop de connaissances spécialisées lors de la construction, on estime généralement approprié de s'en tenir à une dimension de 3 m à 6 m (à 6/4 GHz) et de l'ordre de 2 m à 4 m (à 14/(11 et 12) GHz). Dans certains cas particuliers, par exemple lorsque les marges d'affaiblissement par les précipitations doivent être plus grandes, on pourrait utiliser de plus grandes antennes.

La taille de l'antenne dépendra d'un examen attentif de la durée de vie prévue de l'antenne ainsi que des facteurs de croissance du trafic. L'antenne est un élément essentiellement passif ne nécessitant pas de maintenance et qui se démode moins vite que les autres éléments du système.

7.3 *Température de bruit typique des stations terriennes*

Les amplificateurs à 4 GHz actuels à faible bruit et de coût raisonnable utilisent pour la plupart des transistors GaAs à effet de champ. Des amplificateurs typiques de cette nature (non refroidis), que l'on peut trouver dans le commerce, ont des températures de bruit de 90 K à 150 K à 4 GHz, et de 250 K à 530 K à 11 GHz. Si l'on admet environ 40 K pour le bruit d'antenne à des angles de site d'au moins 30°, on pourrait obtenir une température de bruit du système de 130 K à 4 GHz et de 290 K à 11 GHz.

7.4 *Emetteur de la station terrienne*

Dans bon nombre de zones rurales, la fourniture de l'énergie primaire présente un problème et il peut être nécessaire de recourir à l'énergie solaire et à des batteries rechargeables. Il faut donc maintenir la consommation d'énergie de la station terrienne à un faible niveau et il faut utiliser la plus basse puissance d'émission possible. Il est indispensable que le satellite ait une grande sensibilité si l'on veut avoir une station terrienne de petite taille. Si l'on maintient la puissance d'émission à une valeur suffisamment basse, cela permettra d'utiliser, dans la station rurale, des émetteurs entièrement transistorisés qui sont beaucoup moins chers et bien plus fiables que les dispositifs à tubes thermo-ioniques.

7.5 *Equipements à une seule voie par porteuse*

L'équipement à une seule voie par porteuse est largement utilisé pour les services à faible trafic. Toutefois, les systèmes existants assurent une très grande souplesse d'exploitation, que l'on pourrait supprimer pour réduire le coût de fonctionnement. En utilisant des oscillateurs à quartz dans les changeurs élévateurs et abaisseurs de fréquence, au lieu de synthétiseurs, on peut réduire les coûts et augmenter la fiabilité de la station terrienne, mais cela entraîne une diminution de la souplesse de fonctionnement du satellite, dont il faut tenir compte.

Si l'assignation en fonction de la demande pour accès multiple n'est pas utilisée au début, des dispositions devront être prises en vue de l'adjonction future de ce type d'équipement, de préférence avec commande centralisée.

Il faudra utiliser un système de signalisation compatible avec une porteuse commandée par la voix.

8. Caractéristiques de la station spatiale

Les caractéristiques de la station spatiale, ou du satellite, jouent un rôle dominant dans la conception du réseau à satellite, puisqu'elles déterminent directement un grand nombre des caractéristiques de la station terrienne. S'il fonctionne avec des stations terriennes de petites dimensions, le satellite (ou les répéteurs utilisés pour les systèmes à faible capacité) devra présenter les caractéristiques suivantes:

- production de grandes p.i.r.e. par utilisation de faisceaux ponctuels, utilisation d'une puissance élevée, ou en combinant ces deux moyens, compte tenu de la zone de service;
- précision du maintien en position tant dans le sens est-ouest que dans le sens nord-sud afin d'éliminer la nécessité de prévoir des dispositifs de poursuite dans les stations au sol;
- sensibilité et gain de transfert accrus.

8.1 *Zone de couverture et dimensions de l'antenne*

Dans le cas idéal, la forme du faisceau de l'antenne de la station spatiale est déterminée par la couverture requise, laquelle limite à son tour le gain d'antenne. Les dimensions matérielles du véhicule de lancement imposent des restrictions aux dimensions du réflecteur principal de l'antenne, qui, selon la fréquence d'exploitation peut se révéler incompatible avec la couverture optimale recherchée.

En général, des couvertures de faisceau comprises entre 17° (couverture de la Terre) et 0,6° et entre 17° et 2,5° conviennent bien, respectivement, aux bandes des 14/(11 et 12) GHz et 6/4 GHz.

On applique la technique du faisceau modelé avec de grands réflecteurs et des dispositifs d'alimentation multiples afin d'obtenir des formes de faisceau optimales ainsi que des faisceaux ponctuels multiples de différentes largeurs ayant pour objet de desservir des zones de couverture précises. Néanmoins, il faut noter que la nature d'un réseau de petite capacité ne permet pas, dans bien des cas, de subdiviser une zone de couverture donnée en régions plus petites qui seraient couvertes par des faisceaux ponctuels multiples.

8.2 *P.i.r.e. de la station spatiale*

La p.i.r.e. totale pouvant être fournie par un satellite dépend de plusieurs facteurs:

- la valeur de la puissance en continu qui peut être fournie par le système d'alimentation du satellite; cette puissance est de l'ordre de 800 W à 1 kW pour les plus petits satellites;
- le rendement des dispositifs d'émission (généralement des amplificateurs avec tube à ondes progressives) dans la transformation de l'énergie en continu en énergie radioélectrique. Les petits satellites actuellement en service donnent généralement une puissance radioélectrique de 200 à 300 W;
- le gain de l'antenne d'émission qui, comme on l'a vu au paragraphe précédent, dépend de la zone de couverture et de la technologie adoptée pour la réalisation de cette antenne.

La masse probable par répéteur, la masse totale disponible pour la charge utile et la gamme de puissances de sortie offerte par les dispositifs d'émission ayant reçu la qualification spatiale sont des facteurs importants pour déterminer le nombre de répéteurs qui constitueront la charge utile et, par conséquent, la puissance de sortie radioélectrique par répéteur. Il existe, aussi bien pour la bande des 4 GHz que pour celle des 11 et 12 GHz, des tubes à ondes progressives qui ont déjà été utilisés dans l'espace et qui donnent des puissances de 10 à 20 W. Des tubes de plus grande puissance sont en cours d'essai ou de mise au point, au moins dans la bande des 11 à 12 GHz.

La puissance de sortie radioélectrique par répéteur et le gain d'antenne d'émission (déduction faite des affaiblissements entre le répéteur et l'antenne) déterminent en fin de compte la p.i.r.e. par répéteur.

8.3 *Maintient en position de la station spatiale et pointage de son antenne*

La possibilité d'exploiter des petites stations terriennes, sans dispositif de poursuite, dépend beaucoup de la précision avec laquelle la station spatiale est maintenue en position. Le Règlement des radiocommunications (article 29) spécifie la précision minimale du maintien en position d'une station dans la direction est-ouest, mais selon le gain de l'antenne de la station terrienne, il faut aussi que ce maintien soit précis dans la direction

nord-sud. On peut atteindre couramment une précision de maintien en position de ± 0,1° dans les deux directions, nord-sud et est-ouest. Cela étant, le diamètre de l'antenne dont on pourrait équiper la station terrienne dépend du maximum acceptable pour la diminution de gain due aux erreurs de pointage résultantes et à la fréquence de travail (voir le Rapport 390).

Egalement importante est la précision avec laquelle le faisceau de l'antenne du satellite est pointée. Dans l'état actuel de la technique, on peut atteindre une précision de pointage du faisceau de ± 0,3°. L'emploi de faisceaux très étroits, qui nécessiteraient une précision de pointage supérieure, compliquerait le système de commande d'attitude.

8.4 *Gain et sensibilité du répéteur*

Pour que le répéteur puisse travailler avec une petite station terrienne, il doit avoir un gain de grande valeur, ce à quoi on arrive plus facilement donnant à l'antenne du satellite un gain à l'émission et à la réception aussi grand que le permet la couverture à assurer. S'agissant de systèmes à satellites travaillant avec de petites stations terriennes, il faut peut-être prévoir une puissance surfacique de l'ordre de -90 dB(W/m^2) à saturation.

L'emploi d'une faible puissance d'émission pour les stations terriennes serait favorisé par un satellite ayant un facteur de qualité (G/T) de grande valeur et un répéteur de gain élevé.

8.5 *Choix de la position du satellite*

On peut obtenir de meilleurs résultats en plaçant le satellite sur l'orbite des satellites géostationnaires, à l'est ou à l'ouest de la zone à desservir. En effet, comme la zone couverte à la surface de la Terre se trouve ainsi vue obliquement du satellite, l'angle solide de rayonnement est plus petit et, par conséquent, la projection de la zone de couverture sur un plan perpendiculaire au trajet de propagation voit son aire diminuée. On peut donc équiper le satellite d'une antenne à gain supérieur et à faisceau étroit, ce qui, au minimum, compense l'allongement ainsi causé au trajet et entraîne globalement une élévation du niveau du signal reçu. De même, cela réduit parfois la sensibilité des stations terriennes à l'instabilité en position de la station spatiale. En revanche, en écartant le satellite de la zone de couverture, on risque de diminuer l'angle de site des antennes des stations terriennes et, par conséquent, d'élever leur température de bruit et d'augmenter l'affaiblissement dû à la pluie, notamment pour les paires de bandes 14/(11 et 12) GHz ou de fréquences supérieures.

8.6 *Eléments à prendre en considération pour obtenir un secteur spatial*

On pourrait obtenir le secteur spatial du système de petite capacité soit en louant des répéteurs dans un système déjà en service, soit en se réservant l'usage d'un satellite faisant partie d'un système régional ou national. La location de répéteurs est intéressante parce qu'elle est immédiatement réalisable, qu'elle ne comporte aucun risque tel que l'échec de la mise en orbite du satellite propre, qu'elle évite les difficultés d'exploitation de ce dernier et qu'elle permet de créer le réseau très rapidement, ce dernier n'ayant pour seule contrainte que le temps d'installation du secteur terrien. D'un autre côté, l'usage réservé d'un satellite offre plus de souplesse pour la conception du système. Dans certains cas, il est préférable de commencer par la location puis de choisir ultérieurement d'autres arrangements, à condition de disposer de satellites qui ont les caractéristiques appropriées.

9. Résumé

Comme indiqué dans la partie principale de ce Rapport, il faut tenir compte de nombreux facteurs pour obtenir le meilleur système à satellites, susceptible de répondre à une série donnée de spécifications. Quelques-uns des facteurs examinés sont les suivants:

- propagation,
- type et performances des méthodes par accès multiple,
- brouillage entre les systèmes radioélectriques adjacents, dans l'espace et au sol,
- techniques des stations terriennes,
- techniques des stations spatiales.

Aucune conclusion n'a été formulée au sujet des paramètres préférés d'un système utilisant des stations terriennes de petite capacité, étant donné qu'ils sont fortement tributaires des conditions particulières de chaque application.

Il est incontestable qu'on maîtrise maintenant les techniques nécessaires pour mettre au point des systèmes de télécommunications par satellite de nature à répondre aux besoins des pays en développement et aux besoins des différentes administrations qui utilisent des stations terriennes de petite capacité. Des systèmes de stations terriennes de petite capacité utilisables dans les zones rurales et éloignées sont étudiés par le GAS 7. Les aspects économiques de systèmes régionaux sont actuellement étudiés par le GAS 8 du CCITT.

ANNEXE I

EXEMPLES DE CALCULS DE LIAISON POUR DES SYSTÈMES A SATELLITES RURAUX NATIONAUX

1. Introduction

La technologie des systèmes à satellites s'améliore sans cesse. Il ne serait donc pas judicieux de chiffrer dans le texte principal du Rapport un grand nombre des paramètres de conception d'un système composé de stations terriennes de faible capacité et des satellites associés. Cependant, pour mieux comprendre les interactions complexes entre ces paramètres, il faut au moins examiner quelques exemples de calculs de liaison. Il faudrait procéder à une analyse beaucoup plus détaillée s'il s'agissait de mettre au point un système réel.

Il serait nécessaire, par exemple, de faire un choix parmi un grand nombre de variantes possibles de la plupart des paramètres, pour la mise en œuvre d'un système particulier. Il conviendrait de faire des études de compromis détaillées pour tenir compte des exigences parfois contradictoires, en vue de minimiser le coût du secteur terrien, d'obtenir un rendement raisonnable dans l'utilisation des satellites et de l'orbite et, en même temps, de fournir le service requis. Il faut aussi prendre en considération la facilité d'installation, d'exploitation et de maintenance.

2. Caractéristiques générales des stations terriennes

La station terrienne doit être spécifiée de manière qu'elle puisse être produite en série sous la forme d'un modèle à montage facile, nécessitant des techniques de construction très simples et très rapides.

La forme de réalisation souhaitable correspondrait à une construction modulaire utilisant exclusivement des composants d'état solide. Comte tenu du compromis normal entre le prix réduit et la fiabilité, le modèle final devrait avoir les caractéristiques suivantes:

- une stabilité adéquate dans toutes les conditions climatologiques pour tous les composants affectant les paramètres de transmission (gain, puissance de sortie, stabilité de fréquence, etc.);
- application des techniques SCPC, avec une largeur de voie comprise entre 20 et 40 kHz;
- un système de signalisation compatible avec le système de commande par la voix utilisé;
- la possibilité d'ajouter ultérieurement un équipement pour accès multiple avec assignation en fonction de la demande (DAMA).

3. Considérations sur la faisabilité des systèmes

Les caractéristiques indiquées ci-après à titre d'exemple représentent un large éventail de possibilités offertes par les techniques actuelles pour réaliser un système à satellites à faible volume de trafic.

Les exemples choisis ont seulement valeur d'indication. Il serait indispensable d'effectuer des études de très grande ampleur, dont la description sortirait du cadre de ce texte, pour faire en sorte que le système finalement mis en œuvre avec un ensemble donné de spécifications soit économique, valable techniquement et compatible avec d'autres systèmes radioélectriques spatiaux et de Terre.

On donnera quatre exemples de satellites (voir le Tableau III) pour spécifier le service à fournir à deux zones de couverture d'étendues différentes, dans chacune des deux paires de bandes de fréquences: 6/4 GHz et 14/(11 et 12) GHz. La zone de couverture la plus étendue est celle qui est desservie par un faisceau d'antenne de satellite de 3° qui, lorsque le satellite est au zénith du centre de la zone, couvre sur la surface terrestre un cercle d'environ 2000 km de diamètre. Si l'on abaisse l'angle de site jusqu'à 30°, ce diamètre se trouve porté à environ 4000 km. La petite zone de couverture, avec un faisceau d'antenne de satellite de 1°, a un diamètre de 700 km, qui est porté à 1400 km pour un angle de site de 30°. On a aussi pris comme exemple quatre petites stations terriennes (voir le Tableau II) pour illustrer les relations entre le fonctionnement des stations spatiales et celui des stations terriennes.

TABLEAU II – *Exemple de caractéristiques de stations terriennes*

	6/4 GHz		14/12 GHz	
Diamètre d'antenne (m)	3	4,5	2	3
Gain à l'émission (dBi)	43,4	46,8	47,2	50,7
Ouverture du faisceau d'émission à 3 dB (degré)	1,2	0,8	0,75	0,5
Gain à la réception (dB)	39,8	43,3	45,5	49,0
Température de bruit du système, T(K) 10 log T	21,1	21,1	24,6	24,6
Facteur de qualité G/T(dB(K^{-1}))	18,7	22,2	20,9	24,4

Note. – On a pris par hypothèse un rendement d'antenne de 60%.

TABLEAU III – *Exemple de caractéristiques de satellites*

Ouverture approximative du faisceau de la zone de service (degrés)	3		1	
Bande de fréquences (GHz)	6/4	14/12	6/4	14/12
Engin spatial				
Diamètre d'antenne (m)	1,1	0,45	2,0 (2)	1,25
Ouverture de faisceau à la réception (degré) (1)	3,2	3,2	1,75	1,2
Gain de crête à la réception (dB)	34,2	34,2	39,4	42,7
Température de bruit du récepteur (K)	800	1300	800	1300
Rapport G/T sur le contour à 3 dB ($dB(K^{-1})$)	2,2	0,0	7,4	8,6
Gain de crête à l'émission (dB)	30,6	32,0	35,8	41,0
Puissance de l'amplificateur TOP (dBW) (3)	7	7	7	7
p.i.r.e. à la saturation sur le contour à 3 dB (dBW) (y compris une perte de 2 dB à la sortie) (4)	32,6	34,0	37,8	43,0
Puissance surfacique du répéteur à la saturation ($dB(W/m^2)$)	−90	−90	−90	−90

(1) Y compris une marge de ± 0,1° pour la précision de pointage du faisceau. Cette valeur suppose également l'emploi de la même antenne pour l'émission et la réception; autrement dit, l'ouverture de faisceau minimale est déterminée par la fréquence de réception.

(2) Hypothèse: réflecteur d'antenne à diamètre maximal.

(3) L'emploi d'un transpondeur de 5 W dans cet exemple ne représente pas la limite de capacité dans ces bandes de fréquences.

(4) Comme indiqué, la p.i.r.e. à l'émission est calculée dans cet exemple d'après le contour de gain à 3 dB. Il convient de noter que la zone de service spécifiée tiendra largement dans cette zone de service à l'émission à 3 dB.

Dans le cas de la modulation de fréquence avec compression-extension et actionnement par la voix, le Tableau IV montre que, avec les caractéristiques types de système, chaque répéteur 6/4 GHz, dans le cas de la grande zone de couverture, a une capacité comprise entre environ 500 et 1000 voies téléphoniques; à 14/(11 et 12) GHz, cette capacité est comprise entre environ 75 et 160 voies téléphoniques, selon les performances de la station terrienne choisie. Pour la petite zone de couverture, les capacités correspondantes sont de 1200 et 400 voies téléphoniques respectivement à 6/4 GHz et 14/(11 et 12) GHz; bien entendu, ces chiffres varieraient également avec la taille de la station terrienne.

Comme indiqué au début de cette section, il ne faut pas perdre de vue que ces exemples n'ont été aucunement optimisés pour permettre de mieux réaliser les objectifs des systèmes à petites stations terriennes, spécifiés dans la partie principale du Rapport. Par exemple, certains de ces exemples ont peu de chance de pouvoir être réalisés avec des émetteurs de stations terriennes à semi-conducteurs. Les exemples sont présentés pour mieux faire comprendre les divers facteurs qui interviennent dans la conception d'un système. Toutefois, une optimisation est possible, compte tenu de la mise en œuvre pratique des systèmes.

TABLEAU IV – *Exemples de bilans de liaison pour transmission SCPC entre deux petites stations terriennes*

Ouverture approximative du faisceau de la zone de service (degrés)	3				1	
Bande de fréquences (GHz)	6,2/4		14,25/11,7		6,2/4	14,25/11,7
Diamètre d'antenne de la station terrienne (m)	3	4,5	2	3	3	2
Recul de la puissance à l'entrée du répéteur ([2]) (dB)	3	5	2,5	2,5	9	3
p.i.r.e./porteuse, liaison montante (dBW)	46,8	42,2	56,4	53,1	37,4	48,7
Autres dégradations (dB)	0,5	0,5	1	1	0,5	1
Affaiblissement sur le trajet (dB)	200	200	207,3	207,3	200	207,3
G/T du satellite (dB(K^{-1}))	2,2	2,2	0	0	7,4	8,6
C/N_0 sur la liaison montante (dB(Hz))	77,1	72,5	76,7	73,4	72,9	77,6
Recul de puissance à la sortie du répéteur ([2]) (dB)	2,3	3	2,1	2,1	5	2,3
p.i.r.e./porteuse, liaison descendante (dBW)	6,9	3,6	17,1	13,8	6,0	18,7
Affaiblissement par la pluie (dB)	0	0	3	3	0	3
Autres dégradations (dB)	0,5	0,5	1	1	0,5	1
Affaiblissement sur le trajet (dB)	196,2	196,2	205,5	205,5	196,2	205,5
G/T de la station terrienne (dB(K^{-1}))	18,7	22,2	19,3([1])	22,8([1])	18,7	19,3([1])
C/N_0 sur la liaison descendante (dB(Hz))	57,5	57,7	55,5	55,7	56,6	57,1
C/N_0 (intermodulation) (dB(Hz))	58,6	57,8	66,8	63,4	60,4	59,5
C/N_0 total (dB(Hz))	55,0	54,8	55,2([3])	55,0([3])	55,1	55,1([3])
Puissance d'émission/porteuse (W)	2,2	0,35	8,3	1,7	0,25	1,4
Capacité du répéteur (voies) (après activité vocale de 40%)	550	1000	75	160	1200	400

([1]) Cette valeur suppose une diminution de G/T de 1,6 dB pendant les périodes où l'affaiblissement par la pluie est de 3 dB.

([2]) Correspond au recul de puissance à l'entrée ou à la sortie de l'ensemble du répéteur. La relation exacte entre ces deux facteurs (et le niveau du bruit d'intermodulation produit pour une valeur donnée de la charge de la porteuse) dépend du répéteur choisi pour la charge utile.

([3]) Cette valeur correspond approximativement à un évanouissement de 3 dB sur le trajet montant ou le trajet descendant.

ANNEXE II

EXEMPLES DE SYSTÈMES

Exemple N° 1

Le système rural installé en Alaska, qui est décrit succinctement ci-après, constitue un exemple d'installations types qu'offre un système à satellites de faible capacité.

Les télécommunications rurales sont essentiellement assurées par un satellite national des Etats-Unis d'Amérique qui fonctionne dans les bandes des 4/6 GHz, encore que certains villages et agglomérations soient desservis par des faisceaux hertziens à visibilité directe ou par des liaisons radioélectriques à ondes métriques ou décimétriques, ou encore par des câbles (souterrains ou sous-marins).

Le système rural assure des services téléphoniques à chaque village de plus de 25 habitants, et ce au moyen de 150 stations terriennes, dont 100, dites stations terriennes rurales, sont situées dans des villages ou à proximité (elles sont dotées d'antennes de 4,5 m de diamètre). La desserte des autres villages est assurée par d'autres moyens, par exemple une liaison radioélectrique à ondes métriques. Un service de santé publique est assuré à 57 de ces stations terriennes. Il utilise plusieurs voies téléphoniques réservées entre les villages et l'un des 8 hôpitaux régionaux qui peuvent conseiller l'assistant sanitaire local quant aux soins médicaux à donner aux malades et, dans les cas extrêmes, assurer l'évacuation vers l'hôpital, généralement par avion, des personnes gravement malades. En outre, une trentaine de stations rurales sont équipées pour recevoir une émission de télévision unique relayée par satellite.

Les systèmes électroniques des stations terriennes isolées sont, dans la plupart des cas, installés dans des locaux existants fournis par les pouvoirs locaux. A l'origine, ces stations étaient généralement dotées de 2 voies SCPC, dont au moins une était affectée au service téléphonique public. Dans 57 des stations, la seconde voie est réservée au service de santé publique. Si la plupart des stations sont équipées pour 2 voies SCPC-MF, certaines n'en ont qu'une (il n'y en a donc pas pour le service de santé publique), quelques stations ont jusqu'à 7 voies et une en a 16.

Le Tableau V donne les caractéristiques des modems fonctionnant dans les voies du réseau de stations isolées. Le Tableau VI donne les objectifs de performances du système.

TABLEAU V – *Caractéristiques des modems des voies du réseau rural*

	Extrémité des voies dans les stations rurales	Extrémité des voies à la station tête de ligne (Bartlett)
Espacement des voies (kHz)	30,0	30,0
Rapport porteuse/bruit (C/N_0) (dB(Hz))	56,0	57,6
Largeur de bande aux fréquences intermédiaires (kHz)	25,7	25,7
Rapport porteuse/bruit (C/N) (dB)	11,9	13,5
Excursion maximale (Hz)	6505	6505
Amélioration par accentuation (dB)	4,9	4,9
Amélioration par compresseur-extenseur (dB)	12,3	12,3
Amélioration subjective du rapport signal/bruit (dB)	45,3	46,9

TABLEAU VI – *Objectifs de performances du système de stations rurales*

	Extrémité des voies dans les stations rurales	Extrémité des voies dans la station tête de ligne (Bartlett)
a) puissance moyenne sur 1 min, pour plus de 20% d'un mois quelconque	18 000 pWp	13 000 pWp
b) puissance moyenne sur 1 min, pour plus de 0,3% d'un mois quelconque	50 000 pWp	50 000 pWp
En règle générale, on établit le bilan de bruit entre les divers sous-systèmes, de la façon suivante:		
Bruit thermique sur la liaison montante, bruit thermique sur la liaison descendante, bruit d'intermodulation dans le satellite, intermodulation hors bande dans la station terrienne, intermodulation dans le répéteur (adjacent et en contrapolarisation):	16 000 pWp	11 000 pWp
Bruit de l'équipement de la station terrienne:	500 pWp	500 pWp
Bruit dû au brouillage (y compris le brouillage produit par des sources de Terre et par des satellites adjacents):	1 500 pWp	1 500 pWp
Bilan total de bruit:	18 000 pWp	13 000 pWp

Exemple N° 2

On peut citer un autre exemple intéressant de système à satellites conçu en partie pour améliorer les communications avec des zones rurales et isolées: il s'agit de la partie 14/12 GHz du système canadien ANIK-B. Le secteur spatial de ce système comporte un seul satellite, fonctionnant dans les bandes 11,7 à 12,2 GHz et 14,0 à 14,5 GHz. Les signaux (dont la p.i.r.e. maximale est d'environ 51 dBW) sont produits par des amplificateurs avec tubes à ondes progressives de 20 W, et transmis par des faisceaux d'antenne de 2° d'ouverture. Quatre de ces faisceaux permettent de couvrir l'ensemble du territoire canadien. On utilise, dans les zones rurales et éloignées, des stations terriennes équipées d'antennes de 1,2 m, 1,8 m, 2,5 m et 3,0 m. Le système distribue des signaux téléphoniques et des signaux de données en modes d'exploitation SCPC et AMRT, ainsi que des programmes de télévision et d'autres signaux vidéo. On développe actuellement les applications de ce système dans les domaines de la télémédecine et de la télééducation, pour remplacer les transports sur grandes distances.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 4F: PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LES RÉSEAUX DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE – UTILISATION DE L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

Avis et Rapports

AVIS 466-3

NIVEAU MAXIMAL ADMISSIBLE DU BROUILLAGE, DANS UNE VOIE TÉLÉPHONIQUE D'UN RÉSEAU A SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISANT LA MODULATION DE FRÉQUENCE AVEC MULTIPLEXAGE EN FRÉQUENCE, PRODUIT PAR D'AUTRES RÉSEAUX DE CE SERVICE

(Programme d'études 2J/4)

(1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que plusieurs réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences;

b) que les brouillages entre réseaux du service fixe par satellite apportent une contribution au bruit dans ces réseaux;

c) qu'il est souhaitable que le bruit, imputable aux brouillages provoqués dans les voies téléphoniques des réseaux du service fixe par satellite par des émissions d'autres réseaux de ce service, soit d'un niveau qui permette d'assurer une efficacité raisonnable d'utilisation de l'orbite;

d) que la qualité globale d'un réseau doit essentiellement rester sous la responsabilité de celui qui conçoit le système;

e) qu'il est nécessaire de protéger un réseau du service fixe par satellite contre les brouillages causés par d'autres réseaux de ce service;

f) qu'il est nécessaire de spécifier la puissance maximale de brouillage admissible dans une voie téléphonique afin de déterminer les caractéristiques des stations spatiales et des stations terriennes;

g) que la valeur retenue pour le niveau maximal admissible de chaque source de bruit dû aux brouillages ne doit pas avoir pour conséquence un espacement minimal entre satellites trop élevé;

h) que la coordination entre deux réseaux à satellite nécessite de connaître le niveau maximal du brouillage admissible dans une voie téléphonique du réseau à protéger du fait des émissions de l'autre réseau;

j) que, dans un réseau du service fixe par satellite, il peut y avoir des brouillages à la réception, aussi bien à bord d'une station spatiale que dans une station terrienne;

k) que la puissance moyenne de bruit dû aux brouillages devrait représenter une fraction appropriée de la puissance de bruit totale admise pour le circuit fictif de référence;

l) que, dans de nombreux cas, les plus importantes contributions au brouillage causé à un réseau à satellite géostationnaire proviendront des réseaux à satellites géostationnaires voisins sur l'orbite et desservant des zones de couverture qui se chevauchent et que les brouillages causés par n'importe quels autres réseaux à satellite seront en général plus faibles;

m) que l'accumulation de brouillages dus à de nombreuses sources provenant d'autres réseaux à satellite et de stations de Terre ne sera probablement pas égale à la somme arithmétique des diverses sources de brouillage, à leur valeur maximale dans toute la bande, et que le niveau total de bruit dû aux brouillages dans une voie quelconque pourra être sensiblement inférieur à cette somme;

n) que les niveaux de brouillage entre les réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnant dans les bandes de fréquences inférieures à 10 GHz ne subiront vraisemblablement pas de grandes variations dans le temps;

o) que, dans les bandes de fréquences comprises entre 10 et 15 GHz où peuvent se produire des affaiblissements de propagation très élevés pendant de courtes périodes de temps, il serait généralement souhaitable que les systèmes utilisent une commande de puissance adaptable sur la liaison montante ou la diversité d'emplacement des stations terriennes ou encore d'autres techniques pour remédier à l'évanouissement du signal et que, dans ces conditions, l'ensemble des brouillages causés par d'autres systèmes à satellites ne subisse pas non plus de grandes variations dans le temps,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les différents réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite qui fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences, inférieures à 15 GHz, devraient être conçus de manière telle que la puissance de bruit dû aux brouillages en un point de niveau relatif zéro d'une voie téléphonique quelconque du circuit fictif de référence pour les réseaux du service fixe par satellite, utilisant la modulation de fréquence, sous l'effet de l'ensemble des émetteurs des stations terriennes et des stations spatiales d'autres réseaux de ce service, ne dépasse pas les valeurs suivantes:

1.1 pour les nouveaux réseaux dans lesquels on n'applique pas la technique de réutilisation des fréquences, 2000 pW0p, puissance psophométrique moyenne pendant une minute, pendant 20% d'un mois quelconque;

1.2 dans les bandes de fréquences dans lesquelles on applique la technique de réutilisation des fréquences, 1500 pW0p, puissance psophométrique moyenne pendant une minute, pendant 20% d'un mois quelconque;

2. que le niveau maximal de la puissance de bruit dû aux brouillages en un point de niveau relatif zéro d'une voie téléphonique quelconque du circuit fictif de référence, dans un réseau à satellite géostationnaire du service fixe par satellite utilisant la modulation de fréquence, sous l'effet des émissions en provenance d'un autre réseau de ce service, ne devrait pas dépasser 600 pW0p, puissance psophométrique moyenne pendant une minute, pendant plus de 20% d'un mois quelconque;

3. que le niveau maximal de la puissance de bruit dû aux brouillages causés à ce réseau devrait être calculé en utilisant pour le gain des antennes de stations terriennes de réception, dans une direction faisant un angle φ (exprimé en degrés) avec la direction principale de rayonnement, les valeurs suivantes:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \text{ dB pour } 1° \leqslant \varphi < 48°$$

$$G = -10 \text{ dB pour } 48° \leqslant \varphi \leqslant 180°$$

sauf si le gain réel est connu et est inférieur à la valeur ci-dessus, auquel cas la valeur réelle devrait être utilisée;

4. que les notes suivantes soient considérées comme faisant partie du présent Avis.

Note 1. – Les valeurs citées aux § 1.1, 1.2 et 2 ne sont pas destinées à s'appliquer aux réseaux pour lesquels une publication anticipée complète a été soumise à l'IFRB avant la XIV^{e} Assemblée plénière; pour ces réseaux, la puissance totale de brouillage dans une voie téléphonique quelconque ne devrait pas dépasser 1000 pW0p, puissance psophométrique moyenne pendant une minute, pendant 20% d'un mois quelconque, et la puissance de brouillage provenant d'une source unique ne devrait pas dépasser 400 pWOp, puissance psophométrique moyenne pendant une minute, pendant 20% d'un mois quelconque.

Note 2. – Le brouillage produit par un réseau quelconque n'atteindra la valeur maximale que sur un nombre limité des voies d'un réseau et par conséquent, pour de nombreuses voies, le niveau total sera inférieur aux totaux indiqués au § 1. Les constructeurs de système pourraient prévoir dans leur bilan de bruit une valeur plus faible pour une grande partie du spectre. La façon dont il doit être tenu compte des valeurs totales dans les objectifs généraux de bruit pour les réseaux du service fixe par satellite est précisée dans la Note 6 de l'Avis 353.

Note 3. – Dans quelques cas, il peut être nécessaire de limiter la puissance de brouillage de chaque source à une valeur inférieure à celle qui est citée au § 2, de telle sorte que la valeur totale recommandée au § 1 ne puisse pas être dépassée. Dans d'autres cas, en particulier dans les arcs encombrés de l'orbite des satellites géostationnaires, les administrations pourront convenir, aux termes d'arrangements bilatéraux, d'appliquer pour chaque source de brouillage des valeurs supérieures à celles qui sont citées au § 2; toutefois, chaque fois qu'une puissance de bruit de brouillage dépasse la valeur recommandée au § 2, il n'en sera pas tenu compte dans le calcul effectué pour voir si la valeur totale recommandée du § 1 est dépassée.

Note 4. – Il est nécessaire d'étudier des moyens permettant d'augmenter le niveau de chaque source de brouillage cité au § 2, sans que pour autant le niveau total de bruit dû aux brouillages ne dépasse les valeurs citées au § 1; cette étude devrait porter par exemple sur la possibilité de résoudre les problèmes de brouillage imputables aux paramètres de réseaux non homogènes.

Note 5. – Il est nécessaire d'étudier la possibilité d'admettre une augmentation des valeurs totales maximales de bruit dû au brouillage recommandées au § 1 et, plus particulièrement, celle qui est citée au § 1.2 pour les réseaux à satellite dans lesquels on applique la technique de réutilisation des fréquences.

Note 6. – Sur les portions de l'orbite des satellites géostationnaires, où il est peu probable qu'il y ait une forte densité de satellites, des limites de puissance de bruit dû aux brouillages inférieures à celle recommandée au § 1 ci-dessus pourraient être utilisées; ceci permettant une augmentation correspondante d'autres contributions de bruit dans le cadre de limites acceptables de puissance totale de bruit.

Note 7. – Les dispositions de cet Avis ont été étendues jusqu'à une fréquence limite supérieure de 15 GHz. Cependant, dans la gamme de fréquences 10 à 15 GHz, on ne dispose pas des mêmes quantités de données de propagation à court terme dans le monde entier; il y a lieu de continuer à analyser ces données, dans le but de confirmer la validité des marges adoptées pour le bruit dû au brouillage.

Note 8. – Il est nécessaire d'étudier d'urgence les marges de bruit de brouillage convenant à des systèmes qui fonctionnent sur des fréquences supérieures à 15 GHz.

AVIS 483-1

NIVEAU MAXIMAL ADMISSIBLE DU BROUILLAGE, DANS UN CANAL DE TÉLÉVISION D'UN RÉSEAU A SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISANT LA MODULATION DE FRÉQUENCE, PRODUIT PAR D'AUTRES RÉSEAUX DE CE SERVICE

(Programme d'études 2J/4)

(1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les brouillages entre réseaux du service fixe par satellite apportent une contribution au bruit dans ces réseaux;

b) qu'il est souhaitable que le bruit, imputable aux brouillages provoqués dans les canaux de télévision d'un réseau du service fixe par satellite par des émetteurs d'autres réseaux de ce service, soit d'un niveau qui permette d'assurer une efficacité raisonnable d'utilisation de l'orbite;

c) que la qualité globale d'un réseau doit essentiellement rester sous la responsabilité de celui qui conçoit le système;

d) qu'il est nécessaire de protéger un réseau du service fixe par satellite contre les brouillages causés par d'autres réseaux de ce service;

e) qu'il est nécessaire de spécifier la puissance maximale de brouillage admissible dans un canal de télévision, afin de déterminer les caractéristiques des stations spatiales et des stations terriennes, telles que les rapports de protection requis et l'espacement minimal entre satellites;

f) que, dans un réseau du service fixe par satellite, il peut y avoir des brouillages à la réception aussi bien à bord d'une station spatiale que dans une station terrienne;

g) que la puissance du bruit dû aux brouillages devrait représenter une fraction appropriée de la puissance de bruit totale admise pour le circuit fictif de référence;

h) que, dans de nombreux cas, les plus importantes contributions au brouillage causé à un réseau à satellite géostationnaire proviendront des réseaux à satellites géostationnaires adjacents et que les brouillages causés par les autres réseaux à satellite seront en général plus faibles,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les différents réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite qui fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences devraient être conçus de manière telle que la puissance des bruits dus aux brouillages dans le circuit fictif de référence pour la télévision dans un réseau du service fixe par satellite utilisant la modulation de fréquence, sous l'effet de l'ensemble des émetteurs des stations terriennes et des stations spatiales d'autres réseaux de ce service, ne dépasse pas 1/10 du bruit total admissible en vidéo-fréquence dans le circuit fictif de référence, pendant plus de 1% d'un mois quelconque;

2. que le niveau maximal de la puissance du bruit dû aux brouillages causés à un réseau à satellite géostationnaire par tout autre réseau à satellite géostationnaire ne devrait pas dépasser 4/10 de la tolérance de brouillage recommandée au § 1 ci-dessus; toutefois, dans quelques cas, il peut être nécessaire de limiter cette puissance de brouillage à une valeur inférieure à 4/10 de la tolérance citée ci-dessus;

3. que le niveau maximal de la puissance du bruit dû aux brouillages causés à ce réseau devrait être calculé en utilisant pour le gain des antennes de stations terriennes de réception dans une direction faisant un angle θ (exprimé en degrés) avec la direction principale de rayonnement les valeurs suivantes:

$$G = 32 - 25 \log \theta \text{ dB pour } 1^\circ \leqslant \theta < 48^\circ$$

$$G = -10 \text{ dB pour } 48^\circ \leqslant \theta \leqslant 180^\circ$$

sauf si le gain réel est connu et est inférieur à la valeur ci-dessus, auquel cas la valeur réelle devrait être utilisée;

4. que les notes qui suivent soient considérées comme faisant partie du présent Avis.

Note 1. – Les valeurs indiquées ci-dessus pour le bruit dû aux brouillages doivent être comprises dans les tolérances totales de bruit, comme il est indiqué dans l'Avis 354.

Note 2. – Sur les portions de l'orbite des satellites géostationnaires où il est peu probable qu'il y ait une forte densité de satellites, des limites de puissance de bruit dû aux brouillages inférieures à celles recommandées ci-dessus pourraient être utilisées, en prévoyant une augmentation correspondante des autres contributions de bruit dans les limites du bruit total admissible.

AVIS 523-1

NIVEAUX MAXIMAUX ADMISSIBLES DU BROUILLAGE DANS UN RÉSEAU A SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISANT LA TÉLÉPHONIE A CODAGE MIC A 8 BITS, PRODUIT PAR D'AUTRES RÉSEAUX DE CE SERVICE

(Programme d'études 2J/4)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que plusieurs réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences;

b) que les brouillages entre réseaux du service fixe par satellite produisent une dégradation du taux d'erreur sur les bits par rapport à ce taux lorsqu'il n'y a pas partage des fréquences;

c) qu'il est souhaitable que le taux d'erreur sur les bits causé dans les réseaux du service fixe par satellite par des émissions d'autres réseaux de ce service soit d'un niveau qui permette d'assurer une efficacité raisonnable d'utilisation de l'orbite;

d) que la qualité globale d'un réseau doit essentiellement rester sous la responsabilité de celui qui conçoit le système;

e) qu'il est nécessaire de protéger un réseau du service fixe par satellite contre les brouillages causés par d'autres réseaux de ce service;

f) qu'il est nécessaire de déterminer la puissance maximale admissible des brouillages aux fréquences radioélectriques dans un système à satellites afin de définir les caractéristiques des stations spatiales et des stations terriennes, telles que les rapports de protection requis et l'espacement minimal entre satellites;

g) que, dans un réseau du service fixe par satellite, il peut y avoir des brouillages à la réception, aussi bien à bord d'une station spatiale que dans une station terrienne;

h) qu'il est souhaitable que l'augmentation du taux d'erreur sur les bits due au brouillage causé par d'autres réseaux à satellite représente une fraction bien définie du taux total d'erreur sur les bits, tel qu'il est défini dans l'Avis 522;

j) que, lorsque des satellites adjacents desservent des réseaux ayant des caractéristiques similaires, les contributions les plus importantes au brouillage subi par un réseau à satellite géostationnaire proviendront des réseaux utilisant ces satellites adjacents, mais que cela n'est peut-être pas vrai lorsque les caractéristiques des réseaux sont hétérogènes;

k) qu'il est peu probable que les niveaux de brouillage entre réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnant au-dessous de 10 GHz varient beaucoup en fonction du temps et que, dans ces conditions, il est préférable de définir la limite de brouillage admissible comme une fraction de la puissance de bruit avant démodulation; on peut ainsi superposer les multiples contributions de brouillage sur la base de l'addition des puissances radioélectriques;

l) que dans les bandes de fréquences comprises entre 10 et 15 GHz, où peuvent se produire des affaiblissements de propagation très élevés pendant de courtes périodes de temps, il serait généralement souhaitable que les systèmes utilisent une commande de puissance adaptable sur la liaison montante ou la diversité d'emplacement des stations terriennes ou encore d'autres techniques pour remédier à l'évanouissement du signal et que, dans ces conditions, les niveaux de brouillages causés par d'autres systèmes à satellites ne subissent pas non plus de grandes variations dans le temps,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les réseaux du service fixe par satellite fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences, au-dessous de 15 GHz, et utilisant des satellites géostationnaires soient conçus et exploités de manière telle que le brouillage total causé à un système téléphonique MIC à 8 bits du service fixe par satellite par les émetteurs des stations terriennes et des stations spatiales de tous les autres réseaux soit conforme provisoirement aux limites suivantes:

1.1 dans les bandes de fréquences où le réseau ne fonctionne pas avec réutilisation des fréquences, le niveau de puissance de brouillage (moyenne calculée sur 10 min quelconques) ne devrait pas dépasser, pendant plus de 20% d'un mois quelconque, 20% du niveau total de la puissance de bruit à l'entrée du démodulateur qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les bits;

1.2 dans les bandes de fréquences où le réseau fonctionne avec réutilisation des fréquences, le niveau de puissance de brouillage (moyenne calculée sur 10 min quelconques) ne devrait pas dépasser, pendant plus de 20% d'un mois quelconque, 15% du niveau total de la puissance de bruit à l'entrée du démodulateur qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les bits;

2. que le niveau maximal de puissance brouilleuse dans l'un quelconque de ces systèmes de téléphonie MIC à 8 éléments binaires, dû à l'un quelconque des émetteurs d'un autre réseau du service fixe par satellite (moyenne calculée sur 10 min quelconques), ne devrait pas dépasser, pendant plus de 20% d'un mois quelconque, 4% du niveau total de la puissance de bruit à l'entrée du démodulateur qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les bits;

3. que le niveau maximal de la puissance de bruit dû aux brouillages causés à ce réseau devrait être calculé en utilisant pour le gain des antennes de stations terriennes de réception, dans une direction faisant un angle φ (exprimé en degrés) avec la direction principale de rayonnement, les valeurs suivantes:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \text{ dB pour } 1^\circ \leqslant \varphi < 48^\circ$$

$$G = -10 \text{ dB pour } 48^\circ \leqslant \varphi \leqslant 180^\circ$$

sauf si le gain réel est connu et est inférieur à la valeur ci-dessus, auquel cas la valeur réelle devrait être utilisée;

4. que les notes qui suivent soient considérées comme faisant partie du présent Avis:

Note 1. – Pour le calcul des limites indiquées aux § 1.1, 1.2 et 2, on doit admettre que la puissance de bruit globale à l'entrée du démodulateur est de nature thermique.

Note 2. – On admet, dans le présent Avis, que le brouillage causé par d'autres réseaux à satellite est de nature permanente; de nouvelles études sont nécessaires en ce qui concerne les cas où le brouillage n'est pas de caractère permanent.

Note 3. – Les valeurs citées aux § 1.1 et 1.2 ne sont pas destinées à s'appliquer aux réseaux pour lesquels une publication anticipée complète a été soumise à l'IFRB avant la XIV^e Assemblée plénière; pour ces réseaux, le niveau de la puissance totale de brouillage (moyenne calculée sur 10 min quelconques) ne devrait pas dépasser, pendant plus de 20% d'un mois quelconque, 10% du niveau total de la puissance de bruit à l'entrée du démodulateur qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les bits.

Note 4. – Dans quelques cas, il peut être nécessaire de limiter la puissance de brouillage de chaque source à une valeur inférieure à celle qui est citée au § 2, de telle sorte que la valeur totale recommandée au § 1 ne puisse pas être dépassée. Dans d'autres cas, en particulier dans les arcs encombrés de l'orbite des satellites géostationnaires, les administrations pourront convenir, aux termes d'arrangements bilatéraux, d'appliquer pour chaque source de brouillage des valeurs supérieures à celles qui sont citées au § 2; toutefois, si la puissance du bruit de brouillage est supérieure à la valeur recommandée au § 2, on n'en tiendra pas compte dans les calculs effectués pour déterminer si la valeur totale recommandée au § 1 est dépassée.

Note 5. – Il est nécessaire d'étudier d'urgence des moyens permettant d'augmenter le niveau de chaque source de brouillage cité au § 2, sans que pour autant le niveau total de bruit dû aux brouillages dépasse les valeurs citées au § 1; cette étude devrait porter par exemple sur la possibilité de résoudre les problèmes de brouillage découlant des caractéristiques des réseaux non homogènes.

Note 6. – Il est urgent d'étudier la possibilité d'admettre une augmentation des valeurs totales maximales de bruit dû au brouillage recommandées au § 1 et, plus particulièrement, celle qui est citée au § 1.2 pour les réseaux à satellite dans lesquels on applique la technique de réutilisation des fréquences.

Note 7. – Sur les portions de l'orbite des satellites géostationnaires, où il est peu probable qu'il y ait une forte densité de satellites, des limites de puissance de bruit dû aux brouillages inférieures à celle recommandée au § 1 ci-dessus pourraient être utilisées, ceci permettant une augmentation correspondante d'autres contributions de bruit dans le cadre de limites acceptables de puissance totale de bruit.

Note 8. – Les dispositions du présent Avis ont été étendues jusqu'à une fréquence limite supérieure de 15 GHz. Cependant, dans la gamme de fréquences 10 à 15 GHz, on ne dispose pas des mêmes quantités de données de propagation à court terme dans le monde entier; il y a lieu de continuer à analyser ces données, dan le but de confirmer la validité des marges adoptées pour le bruit dû au brouillage.

Note 9. – Il est nécessaire d'étudier d'urgence les marges de bruit de brouillage convenant à des systèmes qui fonctionnent sur des fréquences supérieures à 15 GHz.

RAPPORT 710-1

RÉPARTITION DE BROUILLAGE DANS LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE FONCTIONNANT A DES FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz

(Programme d'études 2J/4)

(1978-1982)

1. Introduction

On a déjà transmis des signaux numériques sur des systèmes du service fixe par satellite. Cette transmission trouvera probablement le plus d'applications dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, région du spectre où l'affaiblissement dû aux précipitations commence à contribuer sensiblement aux évanouissements.

Dans les systèmes numériques, la répartition du bruit et du brouillage peut être différente de ce qu'elle est dans les systèmes analogiques. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, si l'objectif de taux d'erreur est satisfait pendant un petit pourcentage du temps, en l'absence d'évanouissements il y a des chances pour que le taux d'erreur soit petit.

L'immunité relative de la modulation numérique à l'égard du brouillage permet de réutiliser les mêmes fréquences dans tout faisceau d'antenne isolé par discrimination contrapolaire, à condition qu'on applique une modulation MDPC bivalente ou quadrivalente. En revanche, avec une modulation MDPC octovalente (ou d'ordre supérieur), on ne peut pas réutiliser les fréquences, parce qu'un tel système est bien plus vulnérable au brouillage. Il s'ensuit que l'utilisation du spectre risque de n'être pas plus efficace pour ces systèmes d'ordre élevé que pour ceux d'ordre inférieur.

2. Causes de brouillage

Le brouillage peut être dû à plusieurs causes. On considérera ici:

- le brouillage contrapolaire dans la même voie;
- le brouillage dû à d'autres sources situées dans le même système à satellites (brouillage intrasatellite);
- le brouillage dû à d'autres systèmes et services à satellites (brouillage extérieur).

Sur les liaisons par satellite de fréquence supérieure à 10 GHz, on peut recourir à la diversité d'emplacement et à la commande de puissance adaptable sur la liaison montante. Dans ce cas, il y a lieu d'en tenir compte si l'on envisage la corrélation des évanouissements des signaux utiles et brouilleurs sur les liaisons montantes et sur les liaisons descendantes.

Sur une liaison descendante, on observera généralement un haut degré de corrélation entre les évanouissements du signal utile et ceux des signaux brouilleurs, du fait que les satellites voisins constituent la principale source de brouillage extérieur (les brouillages dus aux systèmes de Terre ne sont pas ici pris en considération). En conséquence, le rapport «porteuse/brouillage sur la liaison descendante» ne se modifiera pas notablement lorsque l'affaiblissement augmentera, cela avec ou sans diversité.

Sur une liaison montante, sauf en cas de co-transmission du signal contrapolaire, il n'y a pas lieu de s'attendre à un affaiblissement simultané sur le trajet du signal et sur celui du brouillage, en raison de l'éloignement géographique des stations terriennes. Le rapport «porteuse/brouillage sur la liaison montante» peut donc être presque proportionnel au niveau de la porteuse dans une liaison montante sans commande de puissance. S'il y a commande de puissance, les variations du rapport «porteuse/brouillage sur la liaison montante» peuvent être sensiblement réduites en cas d'évanouissement sur cette liaison. Quand on recourt à un découplage de polarisation pour les émissions faites sur la même fréquence par la même station terrienne, en présence d'évanouissements, il est vraisemblable que le brouillage dû au co-canal sera prédominant.

En règle générale, il y a lieu de s'attendre à une faible corrélation entre les évanouissements sur la liaison montante et sur la liaison descendante, de sorte qu'il n'y aura simultanéité des évanouissements profonds que pendant un pourcentage du temps négligeable.

Dans le paragraphe suivant, on trouvera des exemples de répartition du brouillage.

3. Exemples de répartition du brouillage dans un système MDPC bivalent à 30/20 GHz

Ces exemples ont été calculés dans les hypothèses suivantes:

- Il y a deux apports de brouillage intrasatellite sur la liaison montante comme sur la liaison descendante.
- En l'absence d'évanouissements, le rapport souhaité porteuse/brouillage intrasatellite est de 35 dB pour la liaison montante et la liaison descendante.
- Lorsque l'on n'utilise pas la commande de puissance, le brouillage extérieur affectant la liaison montante augmente de 3 dB le bruit thermique du satellite.

- Les signaux contrapolaires sur la liaison montante sont émis à partir de la même station terrienne.
- Le rapport de découplage *XPD* sur le trajet de transmission, qu'il y ait ou non évanouissement dû à la pluie, peut être représenté approximativement par la relation ci-dessous, extraite du Rapport 564:

$$XPD = U - 23 \log (\mathrm{CPA}) \quad (1)$$

dans laquelle:

$$U = 30 \log f - 40 \log (\cos \varepsilon) - 20 \log (\sin 2\tau) \quad (2)$$

f: fréquence (GHz),

CPA : affaiblissement du signal copolaire (dB),

ε : angle de site ($10° \leqslant \varepsilon \leqslant 60°$),

τ : inclinaison du plan de polarisation sur le plan horizontal ($10° \leqslant \tau \leqslant 180°$).

- Les valeurs du rapport de découplage *XPD* de l'antenne du satellite et de l'antenne de la station terrienne sont respectivement de 30 dB et de 35 dB. (En raison de la cohérence du brouillage contrapolaire sur chaque trajet de transmission, ces valeurs se combinent entre elles et avec la valeur du rapport *XPD* dans l'atmosphère, selon la loi d'addition des tensions.)
- Les valeurs d'affaiblissement dû à la pluie aux fréquences 30 GHz et 20 GHz sont respectivement de 17,5 dB et 9 dB (pour 0,3% du mois le plus défavorable à Halifax et pour un angle de site de 17° – voir la Fig. 1 du Rapport 866). On suppose que l'évanouissement de 9 dB à 20 GHz augmente de 3 dB la température de bruit thermique sur la liaison descendante.
- Sur la liaison descendante, il y a deux apports de brouillage extérieur; on admet qu'ils sont équivalents au brouillage intrasatellite.
- La probabilité pour que la liaison montante et la liaison descendante subissent simultanément un évanouissement important est suffisamment petite pour pouvoir être négligée.

Les Tableaux I et II donnent des exemples de bilans du bruit sur la liaison montante et sur la liaison descendante avec évanouissement et sans évanouissement. Dans les conditions de propagation normales, les valeurs de *XPD* dans l'atmosphère calculées d'après la formule (1) ci-dessus sont de 45 dB à 30 GHz et de 40 dB à 20 GHz. Lorsqu'il y a affaiblissement dû à la pluie, elles tombent à 16,5 et 17,8 dB. Il est entendu que, dans la formule (2), on a pris $\varepsilon = 17°$ et $\tau = 45°$.

Les brouillages internes au satellite sur la liaison montante, le brouillage externe ainsi que le bruit thermique sont réduits à 17,5 dB en dessous du niveau du signal lorsque l'on n'utilise pas la commande de puissance. Dans le cas contraire, le brouillage externe peut être maintenu égal à 31,7 dB. Il en résulte que l'on peut obtenir, pour le rapport «porteuse/bruit plus brouillage» sur la liaison montante, une valeur de 11,2 dB qui est supérieure de 0,9 dB à ce qu'elle est en l'absence de commande de puissance.

Le Tableau III fait connaître la valeur totale du rapport «porteuse/bruit plus brouillage» déduite des Tableaux I et II.

Entre les cas du fonctionnement avec et sans commande de puissance sur la liaison montante, avec évanouissement sur cette liaison, la différence des valeurs du rapport total «porteuse/bruit plus brouillage» est d'environ 1 dB.

4. Effet des brouillages entre réseaux sur les marges de protection contre les évanouissements

Il se peut qu'un système à satellite exploité au-dessus de 10 GHz soit conçu de manière à disposer d'une marge de puissance suffisante pour qu'une dégradation mineure du rapport porteuse/bruit due à un brouillage ne soit, par temps clair, un facteur significatif. Cependant, quand la pluie est cause d'évanouissements, le brouillage entravera le bon fonctionnement du système en entraînant une réduction des marges d'évanouissements par la pluie. Là, la réduction de la marge nominale d'évanouissement représente, du point de vue du système, une véritable perte. Par exemple, si le brouillage entraîne une diminution de 1 dB de la marge d'évanouissement, il faudra, en compensation, augmenter de 1 dB la puissance de l'émetteur, réduire de 20% le débit binaire ou accroître de 12% le diamètre de l'antenne. La question du brouillage admissible peut donc être considérée du point de vue de la dégradation des marges applicables aux systèmes. Yeh [1981] étudie les dégradations en dB de la marge de réalisation d'une liaison dans le cas d'un système à satellite (dégradations rapportées à un seuil de système de $P_e = 10^{-3}$), en fontion du diamètre de l'antenne de la station terrienne (avec l'enveloppe de lobes latéraux recommandée par le CCIR), de l'espacement des satellites et des paramètres de la liaison montante (14 GHz) et de la liaison descendante (12 GHz) par ciel clair. Cette analyse ne couvre pas de sources de bruit autres que les sources de bruit thermique et le brouillage dû aux satellites; elle admet un mode d'exploitation particulier qui maintient à saturation le répéteur du satellite mais elle donne des indications sur les compromis à faire entre la répartition de brouillage aux satellites et la capacité orbitale.

5. Résumé

On a tenté de reconnaître certaines des causes possibles de brouillage dans un système numérique du service fixe par satellite exploité dans des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

TABLEAU I – *Exemple de répartition possible du bruit et du brouillage sur la liaison montante*

	dB en dessous du signal			
	sans évanouissement		avec évanouissement	
	sans commande de puissance	avec commande de puissance	sans commande de puissance	avec commande de puissance
1. Brouillage par polarisations croisées dû au co-canal:	25,2	25,2	14,0	14,0
1.1 *XPD* de l'antenne de la station terrienne	35	35	35	35
1.2 *XPD* dans l'atmosphère	45	45	16,5	16,5
1.3 *XPD* de l'antenne du satellite	30	30	30	30
2. Bruit thermique, plus autres brouillages:	30,2	17,7	12,7	14,4
2.1 Brouillage interne au satellite (2 contributions)	35	20,8	17,5	17,5
2.2 Brouillage externe	35	35	17,5	31,7
2.3 Bruit thermique	35	20,8	17,5	17,5
3. Valeur du rapport «porteuse/bruit plus brouillage» sur la liaison montante	24,0	17,0	10,3	11,2

TABLEAU II – *Exemple de répartition possible du bruit et du brouillage sur la liaison descendante*

	dB en dessous du signal	
	sans évanouissement	avec évanouissement
1. Brouillage par polarisations croisées dû au co-canal:	24,5	15,0
1.1 *XPD* de l'antenne de la station terrienne	35	35
1.2 *XPD* dans l'atmosphère	40	17,8
1.3 *XPD* de l'antenne du satellite	30	30
2. Bruit thermique, plus autres brouillages:	24,8	13,7
2.1 Brouillage interne au satellite (2 contributions)	35	35
2.2 Brouillage externe (2 contributions)	35	35
2.3 Bruit thermique	25,8	13,8
3. Valeur du rapport «porteuse/bruit plus brouillage» sur la liaison descendante	21,6	11,3

TABLEAU III - *Valeur du rapport total (porteuse/bruit plus brouillage),*

Rapport total (porteuse/bruit plus brouillage), (dB)					
sans évanouissement		avec évanouissement sur la liaison montante		avec évanouissement sur la liaison descendante	
sans commande de puissance	avec commande de puissance	sans commande de puissance	avec commande de puissance	sans commande de puissance	avec commande de puissance
19,6	15,7	10,0	10,8	11,1	10,3

On a calculé, en se fondant sur les hypothèses décrites, un bilan de bruit et de brouillage pour une liaison.

On a également abordé la question des effets généraux exercés par les brouillages entre réseaux sur les marges de protection utilisables contre les évanouissements pour les systèmes exploités dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

YEH, Y. S. [1981] On the Spacing of Digital Satellites, à paraître dans *IEEE Trans. Comm.*

AVIS 524-1

NIVEAUX MAXIMAUX ADMISSIBLES DE LA DENSITÉ DE p.i.r.e. HORS AXE RAYONNÉE PAR LES STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE FONCTIONNANT DANS LA BANDE DES 6 GHz

(Programme d'études 2J/4)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que plusieurs réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite fonctionnent dans les mêmes bandes de fréquences;

b) que les brouillages entre réseaux du service fixe par satellite contribuent au bruit dans ces réseaux;

c) qu'il est nécessaire de protéger un réseau du service fixe par satellite contre les brouillages causés par d'autres réseaux de ce service;

d) qu'il est nécessaire de spécifier les niveaux maximaux admissibles de la densité de p.i.r.e. émise hors axe par les stations terriennes afin de déterminer des caractéristiques des stations spatiales et des stations terriennes telles que les rapports de protection requis et l'espacement minimal requis entre satellites sur l'orbite;

e) que les réseaux du service fixe par satellite peuvent recevoir des brouillages dans le récepteur de la station spatiale;

f) que, dans bien des cas, les contributions les plus importantes au brouillage causé à un réseau à satellite géostationnaire proviendront des réseaux utilisant des satellites géostationnaires adjacents, et que les brouillages causés par n'importe quel autre réseau seront en général d'un niveau plus bas;

g) que le niveau du brouillage causé par une station terrienne à une station spatiale du service fixe par satellite, fonctionnant dans une bande de fréquences inférieure à 10 GHz, paraît devoir ne pas varier beaucoup avec le temps;

h) que l'emploi d'antennes ayant les meilleurs diagrammes de rayonnement réalisables permettra l'utilisation la plus efficace du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les futures stations terriennes des réseaux du service fixe par satellite qui émettent dans la bande des 6 GHz devraient être conçues de façon telle qu'à tout angle φ au moins égal à 2,5° par rapport à l'axe du faisceau principal d'une antenne de station terrienne, la densité de p.i.r.e. dans un angle de 3° centré sur la direction de l'orbite des satellites géostationnaires ne devrait pas dépasser les valeurs suivantes:

1.1 pour les émissions des systèmes autres que ceux envisagés aux § 1.2 et 1.3 ci-dessous:

Angle hors axe:	*P.i.r.e. maximale par 4 kHz:*
$2{,}5° \leqslant \varphi < 48°$	$(35 - 25 \log \varphi)$ dB(W/4 kHz)
$48° \leqslant \varphi \leqslant 180°$	-7 dB(W/4 kHz)

1.2 pour les émissions des systèmes SCPC-MF de téléphonie commandés par la voix:

Angle hors axe:	*P.i.r.e. maximale par 40 kHz:*
$2{,}5° \leqslant \varphi < 48°$	$(42 - 25 \log \varphi)$ dB(W/40 kHz)
$48° \leqslant \varphi \leqslant 180°$	0 dB(W/40 kHz)

1.3 pour les émissions des systèmes SCPC-MDP de téléphonie commandés par la voix:

Angle hors axe:	*P.i.r.e. maximale par 40 kHz:*
$2{,}5° \leqslant \varphi < 48°$	$(45 - 25 \log \varphi)$ dB(W/40 kHz)
$48° \leqslant \varphi \leqslant 180°$	3 dB(W/40 kHz)

2. que les notes ci-après doivent être considérées comme faisant partie du présent Avis.

Note 1. – Les valeurs mentionnées au § 1.2 ci-dessus sont fondées sur une analyse du bruit de puissance moyenne. On n'a pas étudié les effets subjectifs possibles des brouillages causés à une porteuse SCPC-MF par un rayonnement de très faible largeur de bande. Ce sujet nécessite un complément d'étude.

Note 2. – Les limites mentionnées au § 1.2 ci-dessus s'appliquent à un fonctionnement normal de la téléphonie dans une bande de base de 4 kHz.

Note 3. – Les valeurs données au § 1.1 ci-dessus proviennent principalement d'une analyse des systèmes MF utilisés en télévision analogique ou en téléphonie multivoie. On ne sait pas encore si les systèmes de télécommande et de mesure des distances fonctionnant dans la bande d'émission, ni si certains types de systèmes à une seule voie par porteuse (SCPC) différents de ceux mentionnés aux § 1.2 et 1.3 satisfont à ces dispositions. Il faut entreprendre des études pour déterminer de quelle manière ces systèmes SCPC pourraient satisfaire aux limites mentionnées ci-dessus.

Note 4. – On obtiendrait une meilleure utilisation de l'orbite ainsi qu'une plus grande facilité de coordination en choisissant des valeurs de p.i.r.e. plus basses dans les lobes latéraux. En conséquence, les administrations devraient s'efforcer d'obtenir des valeurs plus basses lorsque cela est possible.

Note 5. – Pour autant que les conditions pratiques le permettent, les stations terriennes existantes devraient avoir des caractéristiques conformes aux valeurs mentionnées ci-dessus.

AVIS 484-2

MAINTIEN EN POSITION EN LONGITUDE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES UTILISANT DES BANDES DE FRÉQUENCES ATTRIBUÉES AU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'orbite des satellites géostationnaires présente, pour les services de télécommunication, une utilité qu'elle est seule à pouvoir offrir;

b) que le brouillage impose une limite au nombre des satellites pouvant utiliser une même bande de fréquences sur un même arc d'orbite, mais que ce nombre pourra augmenter avec l'amélioration de la précision du maintien en position;

c) que le nombre de satellites opérationnels qui utiliseront cette orbite au cours des prochaines années va vraisemblablement augmenter de façon substantielle;

d) que la technique permet de maintenir la position des satellites à moins de $\pm$ 0,1°, bien qu'il puisse ne pas être possible de respecter cette norme pour certains satellites conçus avant 1982,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les stations spatiales installées à bord des satellites géostationnaires utilisant les bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite:

1. devraient être maintenues en position à moins de ± 0,1° de longitude de leur position nominale, quelle que soit la cause de la variation de leur position;

2. ne sont cependant pas tenues d'observer les limites spécifiées au § 1 ci-dessus tant que le réseau à satellite auquel elles appartiennent ne cause pas de brouillage de niveau inacceptable au détriment de tout autre réseau à satellite dont la station spatiale observe les limites fixées au § 1 ci-dessus;

3. que la note suivante soit considérée comme faisant partie du présent Avis.

Note. – Dans le cas des stations spatiales installées à bord de satellites géostationnaires qui sont mises en service avant le 1er janvier 1987, la publication anticipée des renseignements relatifs au réseau ayant été effectuée avant le 1er janvier 1982, et dans le cas de stations expérimentales installées à bord de satellites géostationnaires, les limites spécifiées au § 1 peuvent être remplacées par ± 0,5°.

RAPPORT 556-2

FACTEURS AFFECTANT LE MAINTIEN EN POSITION DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Sur certaines parties de l'orbite des satellites géostationnaires où la densité des satellites est relativement faible, la précision du maintien en position n'est pas une condition préalable essentielle à la limitation des brouillages entre systèmes. Mais l'introduction de nouveaux systèmes à satellites va augmenter cette densité, aussi, si l'on ne veut pas restreindre le développement de nouveaux systèmes, serait-il souhaitable de maintenir tous les satellites en position dans les limites d'une tolérance raisonnable.

Le Rapport 453, dans lequel on examine certains des facteurs techniques dont dépend l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, a attiré l'attention sur le fait que l'on pourrait accroître cette efficacité si l'on pouvait commander avec plus de précision la position des satellites. De légères inclinaisons orbitales ne diminuent guère la capacité de l'orbite, mais il n'en est plus de même, et la réduction de capacité risque alors de devenir substantielle, lorsque la dérive longitudinale devient une fraction notable de l'espacement entre satellites (voir aussi le Règlement des radiocommunications, numéros 2616, 2617 et 2619).

2. Facteurs qui influent sur la position d'un satellite

Lorsque la position longitudinale des satellites est sujette à quelque incertitude, en raison, par exemple, d'une dérive en longitude ou de l'inclinaison de l'orbite, il en résulte une diminution de la capacité potentielle de l'orbite des satellites géostationnaires. Cette diminution dépend de l'ampleur de la variation longitudinale et de l'espacement nominal entre les satellites. Par exemple, une variation longitudinale de 1° subie par des satellites qui devraient être séparés de 5° si le maintien en position était parfait abaisserait le rendement d'utilisation de l'orbite à 79% de la valeur maximale théorique et ce rendement tomberait à 62% si l'espacement requis était ramené à 2,5°.

Le déplacement en longitude des satellites géostationnaires est dû principalement aux causes suivantes:

- inclinaison de l'orbite,
- variation de la période orbitale,
- excentricité de l'orbite,
- erreurs dans la détermination des paramètres orbitaux.

Ces différents éléments sont étudiés successivement dans les paragraphes qui suivent.

2.1 *Inclinaison de l'orbite*

Les champs de gravitation du Soleil et de la Lune ont principalement pour effet de faire varier l'angle d'inclinaison du plan de l'orbite des satellites quasi géostationnaires. Pour les satellites situés dans le plan équatorial, la vitesse initiale de variation de l'inclinaison est actuellement d'environ 0,86° par an, mais cette valeur varie d'une année à l'autre pour des raisons d'ordre astronomique; elle est comprise entre 0,75° et 0,95°. La vitesse de variation tend à diminuer lorsque l'inclinaison augmente. Vue de la Terre, l'inclinaison orbitale entraîne

une excursion quotidienne du satellite vers le nord et vers le sud du plan équatorial. Cette excursion a aussi une composante en longitude, si bien que le satellite décrit un trajet en forme de 8. La Fig. 1 indique l'ampleur de ce mouvement longitudinal; il est de ± 0,11° pour un angle d'inclinaison de 5° et augmente en même temps que les angles d'inclinaison. Si l'on veut corriger l'inclinaison orbitale à l'aide de systèmes de propulsion secondaires, il faut, dans l'état actuel de la technique, exiger beaucoup plus du système de propulsion du satellite.

Les Rapports 390 et 453 étudient certains effets de l'inclinaison de l'orbite sur la conception des systèmes.

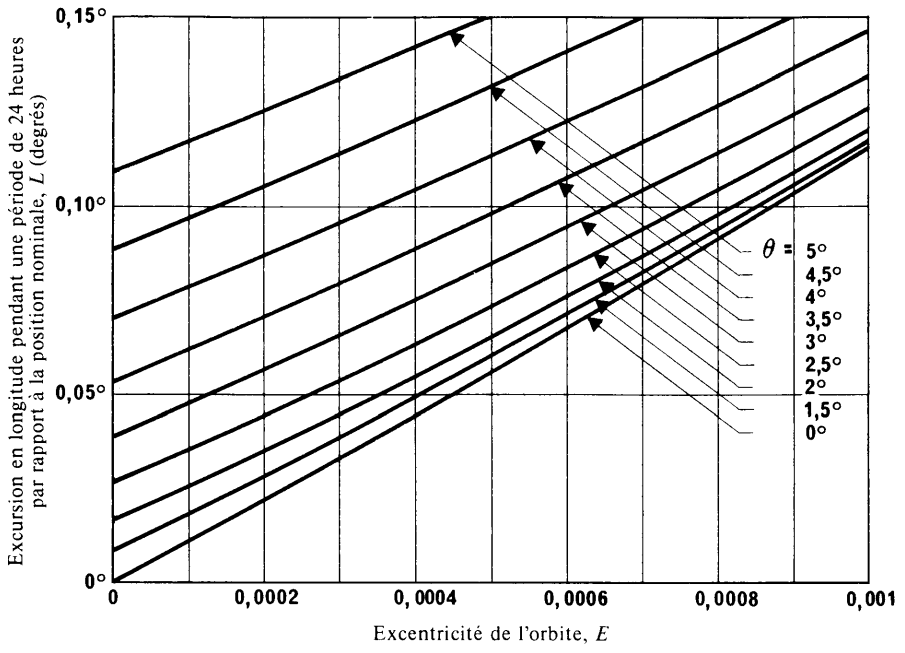


FIGURE 1 – *Variation maximale quotidienne de la longitude due à l'excentricité et à l'inclinaison de l'orbite*

θ (degrés): inclinaison de l'orbite

Note. – La variation longitudinale journalière crête-à-crête en longitude est le double de la valeur indiquée sur la figure ci-dessus.

2.2 *Variations de la période orbitale*

Au voisinage de 76,8° est et de 108,1° ouest de longitude, un satellite placé sur l'orbite des satellites géostationnaires et dont la période orbitale initiale a été déterminée avec précision ne dérivera ni à l'est ni à l'ouest. Le champ de gravité de la Terre diminue, à partir de ces points stables, le long de l'orbite des satellites géostationnaires dans les deux directions. Il existe deux points d'équilibre instable situés aux environs de 161,8° est et 12,2° ouest de longitude. Aux autres points de l'orbite, ces forces dues aux irrégularités du champ de gravitation terrestre agissent sur un satellite pour augmenter ou diminuer sa période de révolution, ce qui provoque une dérive lente vers l'est ou vers l'ouest. L'erreur de longitude qui en résulte doit être ramenée de temps en temps à une valeur acceptable; on pourrait atteindre peut-être une précision de quelques centièmes de degré moyennant une correction quotidienne. Toutefois, des corrections aussi fréquentes sont difficiles à réaliser techniquement, puisqu'il est nécessaire de déterminer les paramètres orbitaux après chaque correction pour mesurer l'effet obtenu. Il devrait être facile d'obtenir une précision de 0,1°, qui supposerait des corrections à intervalles de quelques semaines.

Pour déplacer en longitude un satellite sur l'orbite des satellites géostationnaires, il faut actionner au moins deux fois ses propulseurs de commande d'orientation est-ouest: d'abord pour amorcer la dérive et ensuite pour l'arrêter. Pour obtenir une dérive de 1° ou de 10° par jour, la modification de la vitesse orbitale (ΔV) doit être respectivement d'environ 2,8 m/s ou 28,5 m/s. Ces modifications de la vitesse sont comparables à celles qui sont de pratique courante pour le maintien en position d'un satellite géostationnaire. Une possibilité totale de modification de la vitesse ΔV, à raison de 53,5 m/s par an, a été couramment demandée dans les spécifications de satellite: environ 50 m/s par an pour le maintien en position dans le sens nord-sud, environ 2,5 m/s par an pour le maintien en position dans le sens est-ouest et peut-être l'équivalent de 1 m/s par an pour les besoins de la commande d'orientation. Ainsi, une seule manœuvre de changement de position avec une dérive de 10° par jour (ΔV total nécessaire = 57 m/s) équivaut à environ 13 mois de maintien en position normale est-ouest et nord-sud. En admettant que la masse du satellite soit de 1000 kg et que le carburant utilisé soit de l'hydrazine ayant une poussée spécifique d'environ 220 s, 26 kg doivent en être consommés pour modifier la position du satellite à un taux de dérive de 10° par jour, quelle que soit la valeur totale du déplacement en longitude.

2.3 *Excentricité de l'orbite*

L'excentricité de l'orbite du satellite entraîne une excursion longitudinale quotidienne de la position apparente: par exemple, ± 0,11° par rapport à la position moyenne pour une excentricité de 0,001 (voir la Fig. 1). Cette excentricité peut être réduite autant qu'on le désire au moment de l'injection sur l'orbite géostationnaire, mais elle se modifie avec le temps. La raison principale de cette modification est la pression du rayonnement solaire qui impose à l'excentricité des variations cycliques au cours de l'année. Cette variation annuelle est comprise, selon toute probabilité, entre 0,0002 et 0,002 pour les types de satellites actuels et projetés, la valeur exacte dépendant du rapport entre l'aire de la surface de projection et la masse du satellite. Si cet effet n'est pas corrigé, on peut montrer qu'il en résultera une dérive en longitude dont la valeur journalière maximale sera comprise entre ± 0,02° et ± 0,25° lorsque le cycle est à son maximum. Il devrait toutefois être possible de réduire très notablement cet effet en faisant une correction appropriée à intervalles de quelques mois.

2.4 *Erreurs dans la détermination des paramètres orbitaux*

La précision avec laquelle un satellite peut être maintenu dans sa position nominale en longitude dépend dans une certaine mesure de la précision avec laquelle ses paramètres orbitaux peuvent être déterminés. Toutefois, si l'on dispose de stations de mesure convenablement situées et de méthodes de mesures appropriées, il est certainement possible de déterminer les positions angulaires du satellite avec une précision meilleure que 0,001°.

Si l'on utilise uniquement les données de mesure de distance reçues par une seule station de poursuite, non seulement on commet des erreurs plus grandes dans la détermination des paramètres orbitaux qu'avec deux stations de poursuite, mais il sera aussi très difficile de déterminer les paramètres orbitaux de façon satisfaisante dans le cas d'une faible inclinaison (proche de 0°). En conséquence, en utilisant seulement une station de mesure de distance, il sera nécessaire d'augmenter la périodicité des déterminations d'orbite et des manœuvres. Si l'on peut mesurer l'azimut du satellite avec une précision de 0,005°, en plus de la distance, une seule station de mesure sera suffisante pour déterminer la position du satellite avec la même précision de 0,005°. On peut y parvenir en utilisant une antenne assurant la poursuite automatique sur des fréquences proches de 20 GHz ou supérieures à cette valeur, moyennant un étalonnage approprié du système de mesure [Kawase et autres, 1981]. Il devrait donc être possible de ramener à une valeur négligeable l'incertitude de longitude due aux erreurs de mesure.

3. Possibilités actuelles

Les satellites Intelsat, Anik (Canada), CS et BSE (Japon) ainsi que d'autres systèmes ont démontré avec succès que l'on pouvait obtenir un maintien en position en longitude de ± 0,1° sans consommation excessive de propergol, même en des points d'instabilité de l'orbite des satellites géostationnaires. Un maintien en position de cet ordre n'a pas de conséquences graves pour la durée de vie du satellite. Les satellites CS et BSE du Japon bénéficient d'un maintien en position de ± 0,1° sans «pénalisation», bien qu'ils soient placés en des points d'instabilité de l'orbite; le demi-axe principal de ces satellites a été déterminé avec une précision de 50 m, à l'aide des données de mesure de distance recueillies pendant huit heures par deux stations de poursuite. On doit toutefois noter qu'une amélioration de la précision du maintien en position nécessite des moyens de calcul accrus, d'où des coûts supplémentaires. D'autre part, cette précision est irréalisable avec certains satellites opérationnels ou expérimentaux existants.

On trouvera dans le Rapport 843 un examen approfondi des techniques appliquées actuellement dans les sous-systèmes de maintien en position. Ce Rapport contient la description de moteurs chimiques et électriques, de leurs performances, et leurs avantages comparés.

4. Conclusions

Pour résumer, la précision de maintien en position est un important objectif pour les satellites géostationnaires, compte tenu de toutes les catégories possibles de mouvement apparent des satellites (mouvement résiduel en longitude, excentricité orbitale résiduelle, inclinaison orbitale), compte tenu également de la précision avec laquelle on peut déterminer la position réelle du satellite.

A mesure que l'on pourra diminuer l'espacement minimal requis entre satellites, du fait de l'amélioration des techniques de radiocommunication, la capacité finale de l'orbite deviendra de plus en plus une fonction de la tolérance réalisable sur le maintien en position des satellites, et tous les moyens technologiques possibles permettant de réduire cette tolérance devraient être étudiés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

KAWASE, S., KAWAGUCHI, N., TANAKA, T. et TOMITA, K. [mars 1981] Precise calibration of geostationary-satellite tracking systems. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-17, **2**, 166-172.

RAPPORT 453-3

FACTEURS TECHNIQUES DONT DÉPEND L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES PAR DES SATELLITES DE TÉLÉCOMMUNICATION PARTAGEANT LES MÊMES BANDES DE FRÉQUENCES

Résumé général

(Programme d'études 2J/4)

(1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

Le présent Rapport répond au Programme d'études 2J/4; il a été établi sur la base des rapports du Groupe de travail intérimaire 4/1, constitué à Genève en septembre 1968, dont le mandat actuel figure dans la Décision 2.

La première réunion du Groupe de travail intérimaire s'est tenue à Ottawa, du 10 au 13 juin 1969, et le rapport correspondant se trouve dans [CCIR, 1969], réunion de Genève, septembre 1969. Le Groupe de travail intérimaire s'est réuni une seconde fois à Londres, du 19 au 23 octobre 1970, et le rapport correspondant se trouve dans [CCIR, 1970-74a]. On trouvera dans [CCIR, 1970-74b], respectivement les rapports de la troisième réunion (Melbourne, 1 au 5 octobre 1973) et de la quatrième réunion (Genève, 5 et 6 mars 1974) du Groupe de travail intérimaire. Le rapport de la cinquième réunion (Munich, 3 au 6 juin 1975) figure dans [CCIR, 1974-78a]. Le rapport de la sixième réunion (Washington, 25 au 29 avril 1977) est contenu dans [CCIR, 1974-78b]. Par ailleurs, pour la révision du présent Rapport, on s'est servi de nombreuses autres contributions.

Avant d'étudier les facteurs techniques complexes qui interviennent dans ce problème, il convient de faire quelques remarques de caractère assez général. Il faut tout d'abord reconnaître que, malgré les avantages indéniables que procure l'orbite des satellites géostationnaires, la couverture maximale de la surface terrestre par un satellite placé sur cette orbite se trouve limitée par des considérations d'ordre géométrique, notamment en ce qui concerne les régions à latitude élevée de la Terre. En raison de ces considérations, il pourrait y avoir une multiplicité de demandes et peut-être aussi des demandes incompatibles, pour certaines parties de cette orbite, qui pourraient ainsi souffrir d'un encombrement à brève échéance. Cela dépend de facteurs d'ordre géographique, de la répartition des populations, de la demande en matière de services de télécommunications, etc. En revanche, d'autres parties de l'orbite des satellites géostationnaires risqueraient d'être peu utilisées pendant un certain nombre d'années encore.

En conséquence, il faut prévoir d'avance les difficultés qui pourraient surgir dans les portions encombrées de l'orbite; pour ce faire, il faut étudier tous les facteurs techniques importants qui permettent de déterminer l'espacement minimal nécessaire pour éviter des brouillages entre des satellites qui utilisent les mêmes fréquences. Ces facteurs techniques sont résumés dans le présent Rapport qui se réfère également à d'autres Avis et Rapports pertinents de la Commission d'études 4. Un exposé général du sujet est aussi présenté dans [Jowett et Jefferis, 1969; Fuenzalida, 1969].

Si le présent Rapport traite principalement de facteurs techniques, d'autres facteurs, la plupart se rapportant à l'exploitation, sont mentionnés. Il convient, en effet, d'insister sur le fait que d'autres facteurs sont aussi de la plus grande importance quand on veut utiliser efficacement l'orbite des satellites géostationnaires et le spectre des fréquences. Le plus important de tous est peut-être l'application efficace des méthodes établies par la Conférence administrative mondiale des radiocommunications, Genève 1979, pour la coordination des fréquences assignées aux stations spatiales et terriennes. L'Article 11 du Règlement des radiocommunications traite de ces questions. Voir aussi le Rapport 454.

Il y a lieu de noter enfin que le présent Rapport est au niveau des principes généraux. Pour s'informer sur les problèmes techniques spécifiques que pose le partage de l'orbite et du spectre, on se référera à d'autres rapports, notamment aux Rapports 388, 390 et 455 ainsi qu'aux Rapports 555, 556, 557, 558, 559 et 561.

La suite du présent Rapport se présente de la façon suivante:

2. Facteurs affectant la relation entre l'espacement angulaire nominal et le rapport porteuse/brouillage

2.1 Diagrammes de rayonnement des antennes de station terrienne

2.2 Avantages résultant de la discrimination de polarisation

2.3 Réutilisation des fréquences grâce à des antennes de satellite à faisceau étroit

2.4 Maintien en position

2.5 Utilisation de bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite pour les liaisons montantes et descendantes

2.6 Répéteurs avec conversion de modulation

3. Optimisation des assignations de fréquence
3.1 Relation entre le rapport porteuse/brouillage à l'entrée et les niveaux correspondants des brouillages dans la bande de base
3.1.1 Porteuse dans la même voie
3.1.2 Entrelacement des fréquences porteuses
3.2 Techniques informatiques

4. Tolérance pour les brouillages entre systèmes

5. Influence des caractéristiques de modulation sur l'utilisation de l'orbite et du spectre

6. Niveau du rayonnement hors axe des antennes de station terrienne

7. Appariage des bandes de fréquences
7.1 Appariage des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite
7.2 Fréquence de conversion pour les satellites à bande étroite
7.3 Emploi de plusieurs couples de bandes de fréquences dans les satellites
7.4 Utilisation de bandes de fréquences du service fixe par satellite pour la connexion avec des satellites utilisés dans d'autres services

8. Utilisation homogène et hétérogène de l'orbite-spectre
8.1 Utilisation homogène de l'orbite
8.1.1 Homogénéité du système
8.1.2 Etude paramétrique d'un ensemble homogène
8.2 Utilisation hétérogène de l'orbite
8.2.1 Etudes faites sur l'espacement des satellites pour des systèmes ayant des caractéristiques particulières
8.2.2 Optimisation de l'utilisation hétérogène de l'orbite
8.3 Etudes de méthodes pratiques permettant une utilisation efficace de l'orbite et du spectre
8.3.1 Réseaux du service à satellite utilisant des antennes de station terrienne à faible gain et à gain élevé
8.3.2 Utilisation de l'orbite lorsqu'une bande est partagée par des satellites de différents services
8.4 Restrictions imposées à certaines caractéristiques des systèmes

9. Réutilisation des fréquences par des satellites géosynchrones sur orbites inclinées

10. Autres facteurs influant sur le nombre et l'emplacement des satellites géostationnaires
10.1 Considérations économiques, opérationnelles et techniques affectant la capacité d'un satellite
10.2 Puissance surfacique à la surface de la Terre
10.3 Influence des courants de trafic
10.4 Facteurs géographiques
10.4.1 Arcs de service
10.4.2 Réutilisation des fréquences
10.4.3 Exemples
10.5 Bandes de fréquences supplémentaires
10.6 Liaisons intersatellites
10.7 Souplesse dans le choix des emplacements des satellites
10.8 Influence des conditions de propagation
10.9 Croisement des faisceaux dans les systèmes à satellites
10.10 Autres facteurs techniques

11. Critères d'efficacité dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences

12. Introduction, étalée dans le temps, de mesures propres à améliorer l'économie de l'utilisation de l'orbite

2. Facteurs affectant la relation entre l'espacement angulaire nominal et le rapport porteuse/brouillage

2.1 *Diagrammes de rayonnement des antennes de station terrienne*

Le diagramme de rayonnement d'une antenne de station terrienne, notamment dans les directions écartées de moins de 10° de l'axe principal ainsi que dans la direction de l'orbite des satellites géostationnaires, est l'un des facteurs les plus importants dans la détermination des brouillages entre systèmes utilisant des satellites géostationnaires. Une réduction des niveaux des lobes latéraux augmenterait notablement l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires.

Il convient de reconnaître que l'on peut améliorer sensiblement les diagrammes d'antenne, par rapport au diagramme de rayonnement de référence donné dans l'Avis 465, en réduisant soigneusement les niveaux des lobes latéraux. Le niveau élevé du rayonnement dans les lobes latéraux est dû principalement à la diffusion causée par le blocage dans l'ouverture de l'antenne. Il existe des configurations d'antenne qui ne présentent pas de blocage, aussi est-il souhaitable de les utiliser. Dans le Rapport 390, sont décrites diverses manières selon lesquelles on peut faire le projet de la construction d'antennes de station terrienne de type Cassegrain de manière à réduire le rayonnement dans les lobes latéraux.

Ainsi, une étude [CCIR, 1974-78c] indique qu'on pourrait obtenir une efficacité d'utilisation de l'orbite d'environ 200% si l'on appliquait l'une ou l'autre des méthodes d'amélioration ci-après à l'enveloppe des lobes latéraux des antennes des stations terriennes, en prenant pour hypothèse un espacement entre satellites égal à 5°:

- Modifier l'exposant de la diminution angulaire de gain en le ramenant de $-2{,}5$ à -3 (Fig. 1a)).
- Réduction de 7 dB du niveau de tous les lobes latéraux. Cela s'applique quelle que soit la valeur de l'espacement entre satellites (Fig. 1b)).

On a estimé qu'il est possible maintenant d'excentrer le réflecteur d'alimentation des antennes de petit à moyen diamètre, mais on n'est pas encore sûr que l'application de cette technique à des antennes de grand diamètre n'entraîne pas des inconvénients d'ordre économique. Néanmoins, il serait souhaitable d'établir prochainement un Avis sur le niveau maximal des lobes latéraux pour les antennes de station terrienne. Pour des antennes de grand diamètre fonctionnant dans les bandes des 4 et 6 GHz, on pourrait utiliser avantageusement le diagramme de rayonnement de référence figurant dans l'Avis 465.

Il serait souhaitable de fixer un objectif nominal pour le niveau de puissance des lobes latéraux qui seront rayonnés par les futures antennes. La condition de fonctionnement ainsi imposée serait un peu plus rigoureuse que celle correspondant à l'Avis dont l'établissement est proposé dans le précédent alinéa. L'une des conditions suggérées, pour des antennes où $D/\lambda > 100$, est la suivante:

- pour les lobes latéraux dont la direction s'écarte d'au plus 3° de l'orbite des satellites géostationnaires,

  $G(\varphi) \leqslant 28 - 25 \log \varphi$ (dB), pour $1° \leqslant \varphi \leqslant 83°$

  $G(\varphi) \leqslant -20$ (dB), pour $\varphi > 83°$

- pour les lobes latéraux axés dans d'autres directions, l'enveloppe définie par le diagramme de rayonnement de l'Avis 465 s'appliquerait.

Les valeurs fixées pour l'objectif nominal exigent cependant un complément d'étude.

Il est évident que l'efficacité d'utilisation de l'orbite est accrue quand il s'agit de systèmes dont les stations terriennes ont un gain et un facteur de qualité (G/T) tous deux élevés.

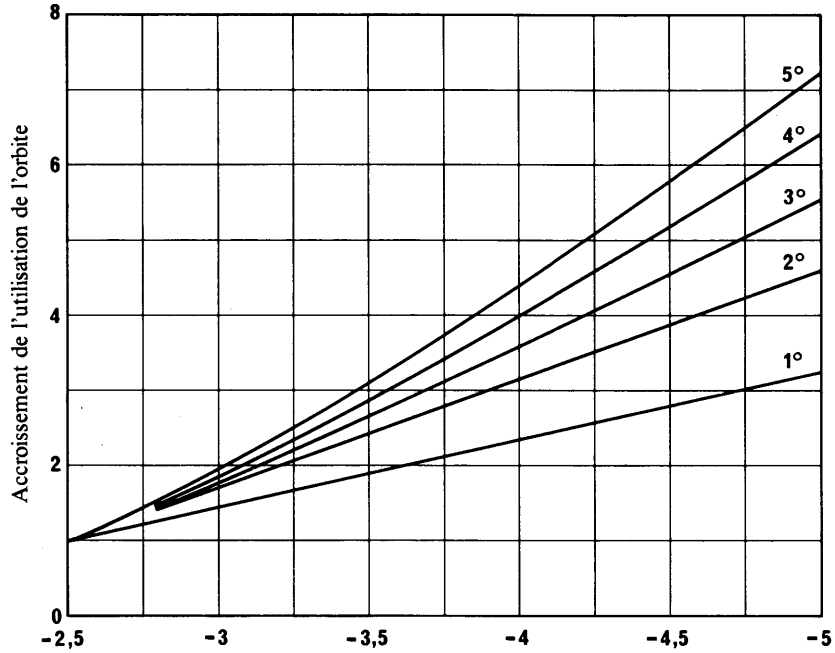
2.2 *Avantages résultant de la discrimination de polarisation*

L'emploi de polarisations rectilignes orthogonales ou de polarisations circulaires devrait permettre d'obtenir une discrimination entre deux émissions faites par le même satellite ou par des satellites très voisins dans la même bande de fréquences. Cela augmentera la discrimination résultant des propriétés de directivité des antennes de satellite et de station terrienne. On trouvera une étude détaillée de cette question dans le Rapport 555.

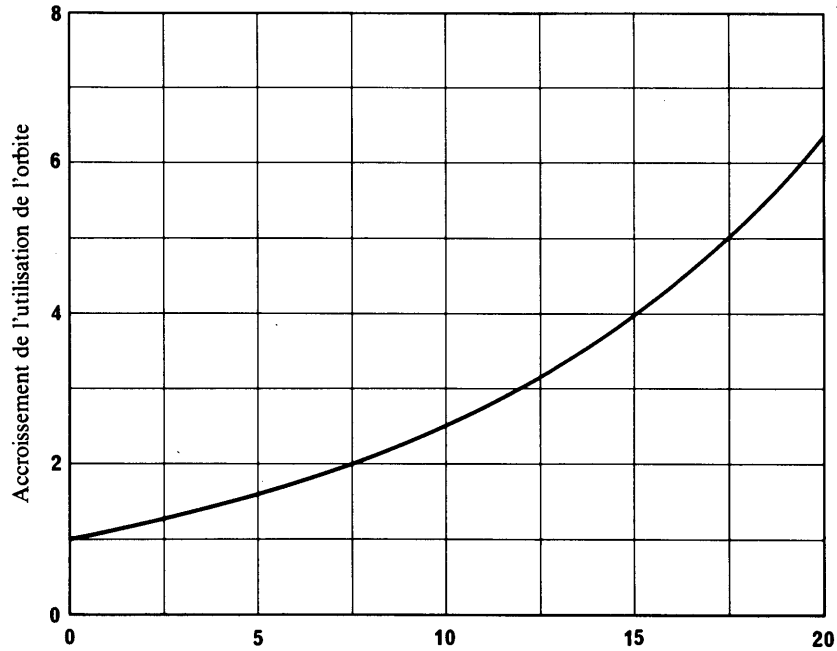
Tant que l'on ne sera pas en possession d'un plus grand nombre de renseignements sur la discrimination de polarisation qu'il est possible d'obtenir dans le lobe principal de divers types d'antennes de satellite et de station terrienne, et tant que l'on n'aura pas une meilleure compréhension de l'étendue des dégradations inévitables de la propagation sur la polarisation des ondes, quelques doutes persisteront quant à la possibilité d'obtenir les 20 à 30 dB de discrimination nécessaires pour pouvoir réutiliser les fréquences dans le lobe principal.

Si des satellites adjacents à polarisation simple utilisent les polarisations orthogonales rectilignes ou circulaires, il serait peut-être possible d'utiliser la discrimination de polarisation dans les lobes latéraux des antennes de station terrienne, en vue de réduire les brouillages entre réseaux à satellites et, partant, l'espacement entre satellites. Il est, dès à présent, certain que la discrimination de polarisation que l'on peut obtenir de cette manière dans les lobes latéraux sera faible, alors que même quelques décibels de discrimination autoriseraient une réduction notable de l'espacement entre satellites. Toutefois, il ne serait pas possible de réaliser systématiquement même ce bénéfice, aussi longtemps que des caractéristiques de polarisation préférées n'auront pas été adoptées. Il faudrait choisir entre la polarisation rectiligne et la polarisation circulaire et, si l'on adopte la première, il faudrait encore choisir entre les plans de polarisation préférés. Faute de renseignements suffisants, on n'est pas actuellement en mesure de faire ces choix.

Le Programme d'études 2J/4 prévoit la poursuite des études sur cette question. Il pourrait être souhaitable de formuler un nouvel Avis indiquant le type de polarisation, rectiligne ou circulaire, auquel il convient de recourir de préférence dans des conditions déterminées (fréquence, ouverture de faisceau, etc.) et recommandant des normes élevées de discrimination par polarisation croisée, même pour les réseaux qui n'utilisent pas à la fois deux polarisations.



a)



b)

FIGURE 1 — *Influence de la réduction de niveau des lobes latéraux des antennes de station terrienne dans un système avec faisceau à couverture mondiale*

L'emploi de la discrimination de polarisation, quel que soit le type de polarisation employé, peut permettre la réutilisation des fréquences dans un même faisceau de satellite. L'accroissement de capacité que l'on peut obtenir, étant donné les rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse nécessaires pour la liaison entière, a été étudié dans [CCIR, 1970-74c] où l'on trouve les conclusions suivantes:

- pour des émissions MRF-MF semblables faites dans la même voie, des valeurs du rapport des porteuses utile à brouilleuse de l'ordre de 23 à 31 dB suffiraient pour limiter le brouillage mutuel à 1000 pWp. Ce rapport étant donné, la capacité totale pour un système à limitation de largeur de bande serait majorée de 60% dans le cas où il n'y aurait pas d'augmentation de la puissance totale sur le trajet descendant et de 100% pour le cas où cette puissance serait doublée. Il n'y aurait aucun accroissement de capacité dans le cas où le système à satellites serait à limitation par la puissance;
- pour des émissions MIC à modulation de phase quadrivalente semblables, faites dans la même voie, et pour un taux d'erreur sur les bits de 10^{-4}, un rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse d'environ 20 dB et une augmentation de 4 dB de la puissance totale sur le trajet descendant permettraient de doubler la capacité totale. Pour des émissions MIC à modulation de phase octovalente, le rapport correspondant requis serait d'environ 25 dB;
- l'entrelacement des fréquences porteuses réduirait d'environ 13 dB les rapports de porteuses requis pour les émissions MRF-MF (voir le § 3 ci-après). Il ne semble pas que l'on puisse escompter un avantage similaire pour les transmissions numériques.

Deux modes de réalisation possibles sont envisagés dans une autre étude [CCIR, 1974-78d]:

Modèle I: utilisation de polarisations orthogonales dans des satellites adjacents, pour permettre de réduire l'espacement orbital,

Modèle II: réutilisation des fréquences dans un même satellite au moyen de polarisations orthogonales, à l'intérieur des faisceaux principaux.

En appliquant la méthode de calcul décrite dans l'Annexe II au Rapport 711, dans un cas homogène, on a obtenu les résultats suivants:

Pour le modèle I, il est possible d'améliorer notablement l'utilisation de la largeur de bande et de l'arc orbital, avec une discrimination de polarisations croisées de 10 à 15 dB entre le lobe latéral de l'antenne de la station terrienne et le lobe principal de l'antenne du satellite. Pour le modèle II, il suffit d'une discrimination de 25 dB entre le lobe principal de l'antenne de la station terrienne et le lobe principal de l'antenne du satellite, et d'une discrimination d'environ 10 dB entre les lobes latéraux des stations terriennes.

On a aussi comparé les améliorations possibles avec les deux modèles, pour une large gamme de valeurs de la discrimination de polarisation. Cette comparaison montre que c'est le modèle II qui permet d'obtenir la plus grande amélioration dans l'utilisation de la largeur de bande et de l'arc d'orbite.

2.3 *Réutilisation des fréquences grâce à des antennes de satellite à faisceau étroit*

L'utilisation des mêmes fréquences porteuses pour desservir des zones différentes de la surface du globe grâce à des satellites géostationnaires adjacents peut se trouver grandement facilitée par l'emploi d'antennes de satellite ayant une ouverture effective bien inférieure à l'angle sous lequel on voit la Terre depuis l'orbite des satellites géostationnaires. Cela signifie que l'espacement angulaire entre des faisceaux pointés vers la Terre est inférieur à 17° et que, pour obtenir la discrimination nécessaire entre le signal utile et le signal brouilleur, il convient que le diagramme du lobe principal des antennes de satellite épouse aussi exactement que possible la forme de la zone de couverture, ce que l'on peut réaliser en modelant le lobe principal dans le plan normal à la direction de propagation. Il faudrait cependant noter que des études sont nécessaires pour déterminer la manière de définir le concept de zone de couverture. En outre, il est souhaitable de modeler le lobe principal de façon à maximiser la p.i.r.e. du satellite, en particulier dans la direction des stations terriennes de la zone de couverture. Les faisceaux modelés peuvent aussi contribuer à une utilisation efficace de l'orbite, par l'application d'un schéma variable permettant la réutilisation des fréquences et la réduction du brouillage. Les progrès accomplis par divers organismes en ce qui concerne le modelage des faisceaux sont résumés dans le Tableau I. Toutefois, à moins qu'il existe un moyen de remodeler le faisceau à bord du satellite, la rigidité de la position orbitale risque d'entraîner une baisse d'efficacité. En règle générale, on peut se servir de la discrimination procurée par des polarisations croisées pour accroître la discrimination effective des lobes latéraux; cela permet de réduire la séparation angulaire requise entre les faisceaux ou d'accroître les ouvertures de faisceaux possibles. Dans certaines circonstances, on peut aussi se servir des mêmes satellites pour émettre des signaux différents sur les mêmes fréquences, deux fois ou même davantage, en utilisant des antennes qui rayonnent vers des régions différentes de la surface terrestre.

Il convient de limiter le rayonnement en dehors de la zone de couverture des antennes de satellite. Il faut encourager l'emploi de techniques permettant de réduire le gain dans le premier lobe latéral et d'augmenter l'affaiblissement dans les lobes latéraux suivants, lesquels illuminent la Terre. A cet égard, des études sur les types d'antenne de satellite ont montré que l'on a des niveaux moins élevés dans les lobes latéraux avec des antennes dont l'ouverture de rayonnement n'est pas bloquée. Il faut signaler toutefois que la réalisation de systèmes complexes sans blocage d'ouverture pose des problèmes qui sont encore mal connus. Un autre moyen d'abaisser le

niveau de rayonnement en dehors de la zone d'ouverture utile consiste à utiliser des antennes à grande ouverture avec décroissance progressive de l'éclairement vers les bords de l'ouverture. Il ne faut pas perdre de vue, cependant, que l'emploi de grandes ouvertures d'antenne entraîne des complications en ce qui concerne les dimensions et la masse des engins spatiaux; de plus, l'utilisation d'un éclairement décroissant vers le bord de l'ouverture conduit à un modelage du lobe principal, avec une diminution rapide du gain en bord de lobe, ce qui impose des exigences d'autant plus rigoureuses sur la commande d'attitude et le maintien en position quand on recherche la couverture d'une zone donnée. (Il convient cependant d'observer qu'un modelage du faisceau permet dans certains cas de se contenter d'une précision moindre pour la commande d'attitude et le maintien en position, par exemple quand on ne peut éviter que la zone couverte soit plus grande que la zone desservie.) Pour une analyse plus détaillée de ces sujets, voir le Rapport 558.

TABLEAU I — *Résumé des progrès des antennes à faisceau modelé*

	LENTILLE				RÉFLECTEUR				
	Lincoln Labs	Raytheon	Hughes	GE	Lockheed	Fairchild	Ford Aerospace	JPL	Ouverture circulaire normalisée
Ouverture du faisceau à haute puissance (faisceau ponctuel)	3°	4°	2°	2°-3°	1.5°	2.5°	2°		2.7°
Gain du faisceau ponctuel	30 dB	28 dB	40 dB	≈40 dB (est.)	36 dB				37.5 dB
Couverture du faisceau large	Couverture globale 17,3°	Couverture globale	5° avec 3 alimentations	Couverture globale 18°	Hémisphère	CONUS et ETZ (1)	CONUS ou zone	ETZ	—
Gain du faisceau large	20 dB	28 dB	≈35 dB	probablement 30 dB, est.	29 dB				
Nombre d'alimentations/de faisceaux	19	500	7	19+61	16	8 pour ETZ	48	7×9 éléments	1
Largeur de bande	5-10%	Octave	250 MHz	8%	8%	alimentation à guide d'onde	alimentation à guide d'onde		alimentation à guide d'onde
Bande de fréquences	Bande X	Bande X Bande K	Bande X	Bande X	4/6 Bande K	Bande K	Bande X		Bande X
Puissance possible	élevée	limitée par la ligne de ceinture	élevée	élevée	élevée	élevée	élevée		élevée
Rendement d'ouverture calculé (faisceau ponctuel)	≈50%		50% mesuré	50% mesuré	55%				56%
Rapport facteur de forme/complexité	modéré	modéré	modéré	modéré à élevé	simple	plate-forme en laiton	simple		—
Niveau des lobes latéraux Faisceau secondaire	20 dB	22 dB	30 dB	15-20 dB pour 19 faisceaux	30 dB	16-25 dB	30 dB		30 dB
Type d'alimentation	Cornet circulaire	Lentille Rotman	Cornet circulaire	Cornet circulaire	Guide d'ondes carré à diélectrique	Guide d'ondes carré à diélectrique	Cornet carré		
Type d'antenne	Lentille à guide d'ondes	Dispositif annulaire à fente	Lentille à guide d'ondes	Lentille à guide d'ondes	Réflecteur à alimentation décalée	Réflecteur à alimentation décalée	Réflecteur à alimentation décalée		Réflecteur parabolique à alimentation centrale
Diamètre d'antenne	76,2 cm	1,22 à 1,52 m	2,13 m	71,1 cm à 114,3 cm	1,83 m		1,05 m		
Rapport *F/D*					0.6	0.6	0.4		
Balayage en dehors de l'axe	±8°	±25°	±9°		±9°				

(1) «Continental» et «East Time Zone».

Pour faciliter les études sur la réutilisation des fréquences par des antennes de satellites à faisceau étroit, il pourrait y avoir intérêt à adopter un diagramme de référence pour les antennes de satellite. Cependant, un projet d'antenne de satellite doit tenir compte de divers paramètres du système, tels que les dimensions et la forme de la zone de couverture, la valeur minimale du gain nécessaire, les limites imposées aux dimensions de l'ouverture et à la densité surfacique de puissance, etc. Il est donc plutôt difficile de définir un diagramme de rayonnement de référence pour une antenne de satellite, applicable à la grande variété de diagrammes complexes qui peuvent être utilisés.

On risque de ne pas tirer pleinement parti des avantages procurés par la réutilisation des fréquences si le réglage d'orientation du faisceau de rayonnement des satellites n'est pas réalisé de façon satisfaisante. Cependant, tant que l'on pourra maintenir cette orientation dans les limites d'une petite fraction de l'ouverture du faisceau (0,2 ou moins), il est peu probable que ces avantages subissent une diminution appréciable. Par exemple, avec l'ouverture de faisceau de 0,5° réalisable actuellement, il est possible d'appliquer cette technique, à condition que l'orientation du faisceau soit maintenue dans les limites de ± 0,1°, ce qui est réalisable. Dans le cas des antennes de satellite à faisceaux étroits, on obtient les avantages suivants avec une meilleure précision dans le pointage du faisceau:

- D'une part, on réduit la probabilité de brouillage entre réseaux à satellite dont la couverture s'étend aux zones de service avoisinantes.
- D'autre part, il est possible de faire en sorte qu'il y ait, au stade de la réalisation, une relation plus étroite entre la zone de couverture du faisceau et la zone de service requise. Il en résulterait une augmentation du gain de l'antenne ainsi qu'une discrimination hors faisceau qui réduiraient encore la probabilité de brouillage entre réseaux à satellite.

Il convient que les antennes de satellite soient conçues de manière telle que la position du satellite sur l'orbite des satellites géostationnaires puisse être modifiée et que le satellite assure néanmoins le service voulu dans ses zones de couverture.

2.4 *Maintien en position et commande d'orientation*

Lorsque la position en longitude de satellites géostationnaires est sujette à quelque incertitude, en raison d'une dérive en longitude ou de l'inclinaison de l'orbite, il en résulte une diminution de la capacité potentielle de l'orbite des satellites géostationnaires. Cette capacité n'est que légèrement diminuée par une inclinaison modérée de l'orbite, mais elle est considérablement réduite lorsque des dérives en longitude se rapprochent de valeurs comparables à l'espacement angulaire minimal admissible des satellites. Les différents facteurs qui influencent la mise en place et la précision du maintien en position des satellites sont étudiés dans le Rapport 556.

Le Règlement des radiocommunications spécifie que tous les satellites géostationnaires du service fixe par satellite doivent être maintenus à moins de ± 0,1° de longitude de leur position nominale. Font exception à cette condition les stations expérimentales ainsi que celles des systèmes dont la publication anticipée aura eu lieu avant le 1er janvier 1982 et la mise en service avant le 1er janvier 1987 (voir les numéros 2618 et 2624 du Règlement des radiocommunications).

A mesure que l'on applique les divers moyens disponibles pour réduire l'espacement minimal nécessaire entre satellites, toute erreur affectant le maintien en position de ceux-ci aura une influence de plus en plus grande. On a étudié [CCIR, 1970-74d] l'occupation homogène de l'orbite par des systèmes de transmission MF-MRF. Certains résultats obtenus sont représentés à la Fig. 2. Il ressort de celle-ci qu'on peut augmenter la capacité totale de l'orbite en élargissant la tolérance sur le bruit de brouillage et en élevant le taux de modulation, dans l'hypothèse où les satellites peuvent être maintenus à leurs positions nominales à ± 0,1° près, alors que la tolérance précédente était de ± 1°. En revanche, un élargissement de la tolérance sur le bruit de brouillage perd beaucoup de son intérêt si les satellites dérivent de ± 0,5° de leurs positions nominales, sans compter que cela entraîne une réduction de la capacité totale de l'orbite, les caractéristiques de transmission demeurant inchangées. Il peut même alors devenir avantageux d'abaisser l'indice de modulation au lieu de l'élever.

Les études visant à améliorer le maintien en position, études menées par les Etats-Unis d'Amérique [CCIR, 1978-82a] et le GTI 4/1, indiquent qu'un maintien de la position en longitude plus précis que ± 0,1° (valeur récemment introduite dans le Règlement des radiocommunications par la CAMR-79) est probablement réalisable sur le plan technique mais n'entraîne pas une réduction importante du brouillage entre systèmes. Cette conclusion reflète le surcroît de complexité des systèmes et les coûts d'exploitation supplémentaires qui sont nécessaires si l'on veut obtenir des tolérances meilleures que ± 0,1°, pour une amélioration modeste du brouillage entre systèmes.

En général, le maintien de la position en latitude n'a pas d'effet important sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, mais des études décrites par l'Italie [CCIR, 1978-82b] indiquent que l'efficacité de fonctionnement d'un système peut être influencée sensiblement lorsque aucune contrainte de latitude (erreurs sur l'angle de lacet) n'affecte les systèmes à réutilisation des fréquences avec polarisation rectiligne et lorsque les stations terriennes n'emploient pas la poursuite de polarisation. Les études montrent que l'utilisation de l'orbite peut être influencée défavorablement par la réduction de capacité qui résulte d'une utilisation moins efficace des différents systèmes. Une influence défavorable analogue peut aussi s'exercer sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires lorsque deux satellites, appartenant à des réseaux différents du service fixe par satellite et peu espacés, voire situés à la même position en longitude sur l'orbite, appliquent la réutilisation des fréquences au moyen de la polarisation orthogonale rectiligne (voir le Rapport 555). Cette question semble justifier une étude complémentaire.

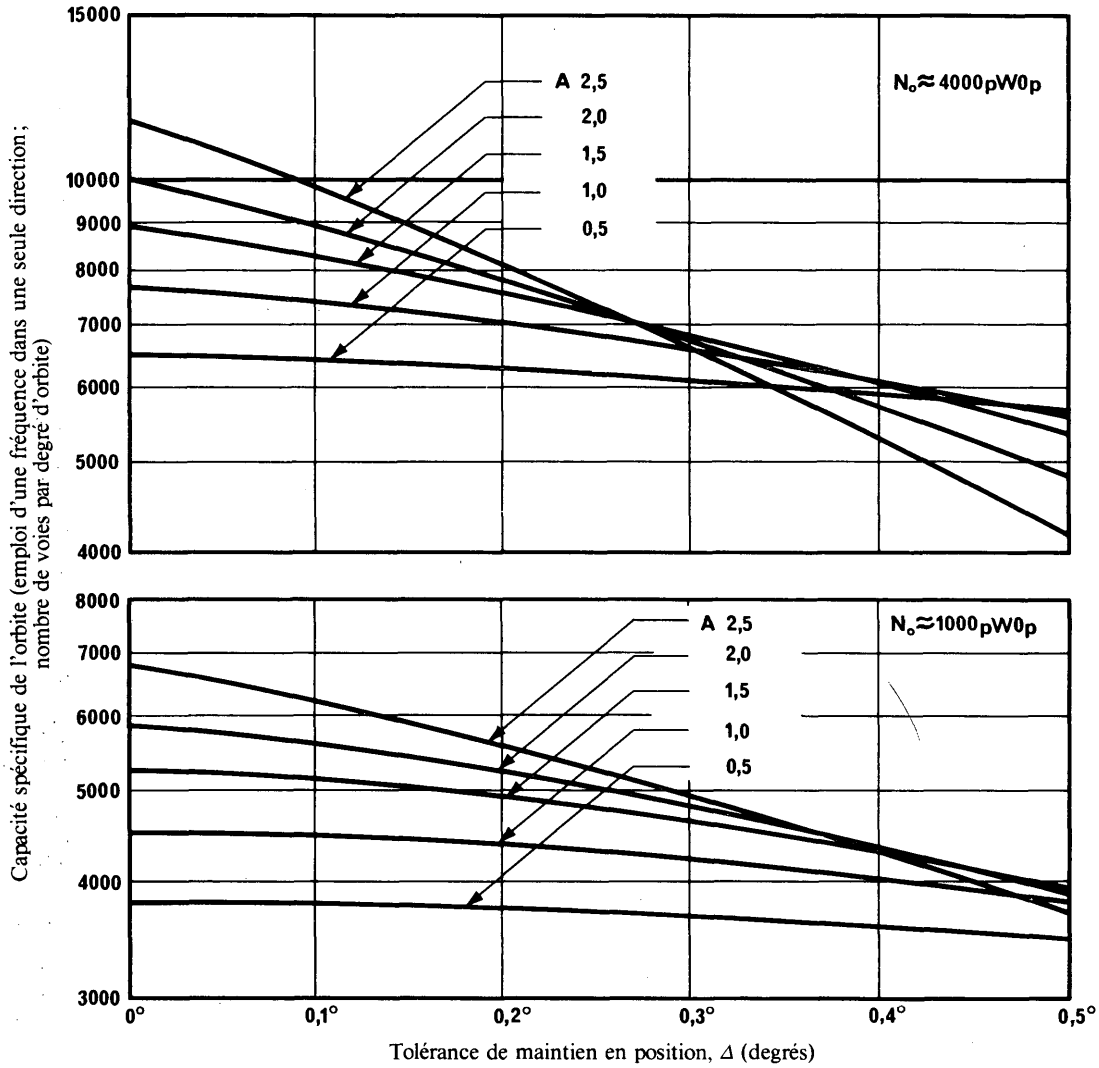


FIGURE 2 — *Capacité spécifique de l'orbite en fonction de la tolérance de maintien en position, pour deux valeurs de la tolérance de bruit de brouillage, avec la valeur efficace de l'indice de modulation comme paramètre*

Système homogène
Faisceaux d'antenne de satellite à couverture mondiale
Antenne de station terrienne de 26 m de diamètre (85 pieds)
Diagramme de rayonnement de référence du CCIR des antennes pour stations terriennes
Largeur de bande: 500 MHz

A : Indice de modulation (valeur efficace)

2.5 *Utilisation de bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite pour les liaisons montantes et descendantes*

On peut arriver à augmenter le nombre des satellites qui utilisent un couple de bandes de fréquences dans un arc donné de l'orbite des satellites géostationnaires en intervertissant les assignations d'un satellite au suivant: la bande assignée au premier satellite pour sa liaison montante est la même que celle assignée au second pour sa liaison descendante. Cette méthode peut, dans une certaine mesure, soutenir la comparaison avec d'autres méthodes pour augmenter la capacité de l'orbite, par exemple l'emploi d'antennes de satellite à gain élevé ou la discrimination de polarisation pour diminuer le brouillage mutuel entre satellites adjacents; elle peut nécessiter une aggravation des critères de partage dans les bandes de fréquences partagées avec les services de Terre. Néanmoins, elle est intéressante et mérite un complément d'étude (voir les Rapports 557 et 561).

Si l'intérêt de cette méthode se confirme plus tard, il sera souhaitable que les administrations déterminent le sens de transmission préféré pour chaque bande de fréquences. Les exploitants de systèmes où les bandes sont utilisées dans le mode non préféré pourraient alors être tenus de veiller à l'effet d'écran du terrain aux emplacements des stations terriennes, si cette précaution doit réduire le brouillage causé à des stations terriennes fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences, mais utilisées dans le mode préféré.

On a mis au point une méthode permettant d'utiliser, dans le sens opposé, des bandes de fréquences qui pourraient réduire de façon significative le coût des stations terriennes: soit deux paires de bandes, chaque paire couvrant, selon le principe actuel du «sens» des émissions, la liaison montante et la liaison descendante. Un spécialiste des systèmes pourrait juger intéressante une interversion d'utilisation des éléments des deux paires de bandes, de telle sorte que l'une de celles-ci soit entièrement utilisée dans un sens et l'autre entièrement utilisée dans l'autre sens. Puisque les bandes de fréquences appariées utilisées dans le mode conventionnel occupent dans le spectre des emplacements voisins l'un de l'autre, on pourrait établir un réseau utilisant le double de la largeur de bande de la paire de bandes la plus étroite utilisée dans le mode conventionnel. De plus, les conditions de propagation seraient à peu près uniformes à toutes les fréquences de la liaison montante et à toutes les fréquences de la liaison descendante.

A titre de démonstration, prenons les paires de bandes 6/4 GHz et 14/11 GHz attribuées au service fixe par satellite. En utilisant les bandes des 14 et des 11 GHz pour la liaison montante et les bandes des 6 et des 4 GHz pour la liaison descendante, les marges à prévoir pour celle-ci (analogues et modérées pour les bandes des 6 et des 4 GHz) diminueraient sensiblement pour porter sur la liaison montante. La largeur de bande totale serait de 1 GHz et les bandes des 6 et des 11 GHz seraient utilisées dans le sens opposé à celui que prévoient les attributions actuelles.

Toutefois, il convient de noter que les stations terriennes d'un tel réseau devront peut-être être implantées à des emplacements différents de ceux des stations terriennes d'autres réseaux utilisant les mêmes bandes, soit dans le mode conventionnel soit dans des conditions inverses de ce mode, afin d'atténuer les problèmes de coordination des fréquences: en outre, cette méthode n'apporte pas en matière d'utilisation de l'orbite et du spectre l'amélioration souhaitée au premier alinéa de la présente section.

2.6 *Répéteurs avec conversion de modulation*

L'étude des facteurs techniques qui influent sur l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires a été faite principalement pour des systèmes assurant des communications dans le service fixe par satellite seulement. Or, on a recours aussi à ce service pour réaliser des liaisons montantes vers les satellites dans d'autres services (par exemple, satellites de radiodiffusion); dans ces conditions, le service fixe par satellite peut présenter des caractéristiques techniques qui ne sont pas forcément optimales du point de vue de l'utilisation de la largeur de bande et de l'arc d'orbite. En pareils cas, on peut avoir intérêt à se référer à d'autres critères pour la conception des systèmes. Dans un cas particulier, il serait possible d'utiliser économiquement le spectre de fréquences disponible en appliquant des techniques spéciales, par exemple une conversion de modulation dans le satellite. Cette technique pourrait conduire à une utilisation plus efficace, pour d'autres services, des bandes de fréquences utilisées pour les liaisons montantes dans le service fixe par satellite; elle pourrait aussi faciliter la coordination entre les systèmes dans les portions d'orbite encombrées.

Une technique possible pour améliorer l'utilisation du spectre des fréquences sur les liaisons montantes est l'utilisation d'une modulation de fréquence à bande étroite, qui peut être réalisée assez simplement. Avec les méthodes modernes de modulation numérique, la bande de fréquences disponible peut être utilisée encore plus efficacement qu'avec la modulation de fréquence, même au prix d'une augmentation de la complexité des répéteurs due à la conversion numérique-analogique.

3. Optimisation des assignations de fréquence

3.1 *Relation entre le rapport porteuse/brouillage à l'entrée et les niveaux correspondants des brouillages dans la bande de base*

3.1.1 *Porteuses dans la même voie*

Les études quantitatives sur l'utilisation de l'orbite et du spectre exigent que l'on connaisse les relations existant entre le rapport porteuse/brouillage à l'entrée et les niveaux correspondants des brouillages dans la bande de base pour différents types de modulation. C'est là un problème technique spécifique qu'il n'est pas nécessaire d'étudier en détail dans le présent Rapport. Le Rapport 388 et sa bibliographie fournissent un résumé utile des conclusions formulées au sujet de cette question. Le Rapport 449 donne les résultats de mesures subjectives et objectives de l'effet du brouillage entre signaux de télévision modulés en fréquence.

3.1.2 *Entrelacement des fréquences porteuses*

Dans certains cas, il est possible de réduire le brouillage entre deux réseaux en entrelaçant les fréquences porteuses. Les avantages que présente cette méthode sont examinés dans le Rapport 455, § 5.

L'utilisation de la méthode de dispersion de l'énergie avec ondes porteuses modulées en fréquence présente un intérêt capital en ce qui concerne les brouillages entre le service fixe par satellite et les services de Terre. Cette méthode diminue en outre les brouillages entre réseaux à satellites lorsque les ondes porteuses brouilleuses ont des fréquences voisines. En revanche, cela n'est pas toujours le cas lorsque l'on considère les brouillages entre des réseaux à l'intérieur du service fixe par satellite, en raison de la valeur élevée du taux de modulation. Quand on étudie les possibilités d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires en séparant les fréquences porteuses, il faut tenir compte du fait que cette technique est moins efficace quand on applique également la dispersion de l'énergie qu'en l'absence de dispersion d'énergie.

Dans le cas de systèmes MIC-MDP quadrivalente, l'entrelacement des fréquences porteuses ne procure généralement aucun avantage.

Lorsqu'un réseau à satellite fonctionne avec réutilisation des fréquences par discrimination de polarisation ou de faisceaux étroits en MRF-MF, l'entrelacement des fréquences permet généralement de réduire la discrimination nécessaire. En revanche, pour un réseau dans lequel on ne pratique pas la réutilisation des fréquences, l'entrelacement des fréquences exigerait le sacrifice d'une bande dont la largeur équivaut à la moitié de celle d'une voie à large bande, ce qui constitue un inconvénient majeur. De plus, lorsqu'un système particulier comporte plus d'un satellite en exploitation et que les stations terriennes sont requises, de temps à autre, de fonctionner avec l'un ou l'autre de ces satellites, l'application de la méthode d'entrelacement des fréquences des deux satellites aurait alors pour résultat d'augmenter la complexité et le coût de la station terrienne. De plus, en ce qui concerne le secteur spatial, les avantages que procurerait un type de satellite normalisé seraient alors perdus.

Etant donné les considérations qui précèdent et la discussion présentée dans le Rapport 455, § 5, les avantages de l'entrelacement des fréquences des satellites peuvent, en pratique, se limiter à relativement peu d'applications.

3.2 *Techniques informatiques*

Selon des études faites au Japon et aux Etats-Unis d'Amérique [CCIR, 1978-82c, d], certains programmes d'ordinateur peuvent servir à optimiser les assignations de fréquence intéressant deux satellites ou plus. Cette optimisation doit permettre de ramener au minimum la séparation requise entre deux satellites ou la valeur maximale du brouillage dans la même voie reçu sur une fréquence quelconque. D'autres critères d'optimisation peuvent aussi être appliqués. Le mode de programmation retenu dans chacune de ces études est assez différent. Ces techniques peuvent être également utilisées pour l'optimisation des plans de fréquences appliqués dans un satellite fonctionnant avec réutilisation des fréquences.

L'application de ces techniques informatiques pourrait aboutir à de sensibles réductions de la séparation requise entre les satellites, notamment pour ceux qui n'appliquent pas la réutilisation des fréquences. Mais la coordination nécessaire entre systèmes à satellites risquerait d'entraîner de sérieuses difficultés d'exploitation compte tenu de l'impossibilité de s'adapter aux modifications intervenues dans les besoins des usagers. Pourtant, l'obligation de mettre en œuvre de nouveaux systèmes pourrait imposer une certaine coordination des assignations de fréquence de ce type.

4. Tolérance pour les brouillages entre systèmes

Des études théoriques ont montré que l'on peut accroître la capacité de l'orbite des satellites géostationnaires en assignant aux brouillages entre systèmes à satellites une bonne partie du bilan de bruit. Par exemple, au-dessous de 10 GHz et en l'absence de réutilisation des fréquences dans les réseaux à satellites, on estime que la capacité totale d'un arc occupé de cette orbite pourrait être accrue d'au moins 75% si la contribution constituée par le bruit entre réseaux, au lieu d'être de 10% du bruit total, était portée à environ 50% du bruit total; on estime également qu'une augmentation de 400 pWp à 1000 pWp de la marge relative à un seul cas de brouillage, pour la téléphonie MRF-MF, a pour effet d'accroître la capacité de l'orbite d'environ 20%.

Cette question est examinée en détail dans le Rapport 455, § 3.

5. Influence des caractéristiques de modulation sur l'utilisation de l'orbite et du spectre

On a étudié [CCIR, 1970-74e, f et g] l'influence exercée par les caractéristiques de modulation sur l'utilisation de l'orbite et du spectre.

Dans les systèmes à modulation de fréquence, la capacité par satellite décroît lorsqu'on augmente l'indice de modulation, mais il y a aussi une diminution de la densité de bruit due au brouillage dans la bande de base, pour un rapport porteuse/brouillage déterminé; cela permet de réduire l'espacement entre les satellites et d'obtenir généralement une utilisation plus efficace de l'orbite des satellites géostationnaires. Les conditions sont à peu près les mêmes pour la modulation numérique avec déplacement de phase, à savoir que la protection d'un signal contre le brouillage augmente lorsque le nombre de phases diminue, ce qui permet, là aussi, de réduire l'espacement entre les satellites. Dans ce cas, on peut obtenir une meilleure utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires lorsque le nombre de phases est compris entre 4 et 8; l'efficacité d'utilisation de l'orbite tend à diminuer si l'on utilise un nombre supérieur ou inférieur de phases.

Dans le cas du brouillage d'une émission MDP par un signal brouilleur à modulation angulaire provenant de plusieurs satellites également espacés, l'effet du brouillage présente un seuil bien caractérisé en ce qui concerne l'espacement entre les satellites. Si l'on abaisse cet espacement au-dessous du seuil, le brouillage augmente rapidement d'intensité. Il ressort de [CCIR, 1974-78e et f] que la valeur de ce seuil dépend de divers paramètres tels que le taux d'erreur admissible, le nombre de phases de la porteuse, le diagramme de rayonnement de l'antenne de la station terrienne et le nombre des satellites brouilleurs.

Les relations existant entre les caractéristiques de modulation et d'autres facteurs qui exercent une influence sur l'utilisation de l'orbite sont examinées plus en détail dans le Rapport 559. (Voir aussi le § 8 ci-après.)

6. Niveau de rayonnement hors axe des antennes de station terrienne

Les renseignements suivants, qui se rapportent en particulier à la bande des 6 GHz, constituent une base pour l'élaboration d'un Avis qui permettrait d'accroître l'efficacité d'utilisation de l'orbite tout en assurant des conditions d'exploitation raisonnables par un grand nombre de nouveaux services.

La définition d'une limite recommandée pour la densité spectrale de la p.i.r.e. en dehors de l'axe du faisceau principal peut être envisagée de deux points de vue différents:

- limitation du niveau de brouillage causé à un autre satellite, en tenant particulièrement compte des brouillages causés aux réseaux utilisant des antennes de station terrienne de grandes dimensions;
- détermination des caractéristiques de la p.i.r.e. dans l'axe du faisceau principal, pour les stations terriennes, en particulier celles qui utilisent des antennes de dimensions relativement petites; prise en considération du gain que ces antennes peuvent être censées fournir dans l'axe du faisceau principal et en dehors de cet axe.

Une étude faite, compte tenu des deux points de vue exposés ci-dessus, a permis de conclure provisoirement que la limite recommandée pourrait s'exprimer de la manière suivante pour les émissions sur la liaison montante à environ 6 GHz.

Pour tout angle $\varphi \geqslant 2{,}5°$ avec l'axe du faisceau principal d'une antenne de station terrienne, la p.i.r.e./4 kHz dans la direction de l'orbite des satellites géostationnaires ne doit pas dépasser les valeurs suivantes:

Angle avec l'axe du faisceau principal	*Maximum de la p.i.r.e./4 kHz*
$2{,}5° \leqslant \varphi \leqslant 25°$	$(E - 25 \log \varphi)$ dB(W/4 kHz)
$25° < \varphi \leqslant 180°$	$(E - 35)$ dB(W/4 kHz)

où la valeur de E serait comprise entre 32,0 et 38,5. La valeur de E devrait être aussi petite que possible; elle variera d'une bande de fréquences à une autre.

Du point de vue du brouillage admissible causé à un réseau à satellite comprenant des antennes de station terrienne de grandes dimensions, il convient de noter qu'en prenant pour E une valeur de 38,5, on obtiendrait une densité maximale de p.i.r.e. de 21,0 dB(W/4 kHz) rayonnée par une station terrienne sous un angle de 5° avec l'axe du faisceau principal.

Du point de vue des conditions raisonnables d'exploitation des stations terriennes possédant des antennes de petites dimensions, on peut considérer les quatre cas suivants:

- puissance porteuse élevée en modulation de fréquence – grande station;
- télévision à modulation de fréquence – petite station (globale);
- télévision à modulation de fréquence – liaison montante vers un satellite de radiodiffusion;
- une seule voie par porteuse (SCPC) – bande étroite.

En se fondant sur les hypothèses suivantes:

- température de bruit du satellite $\leqslant$ 3000 K,
- gain de l'antenne du satellite $\geqslant$ 16 dB,
- antenne de la station terrienne conforme aux dispositions de l'Avis 465 pour les angles par rapport à l'axe du faisceau principal inférieurs à 25°, l'enveloppe des lobes latéraux ayant un niveau constant de –3 dBi pour les angles supérieurs à 25°,
- $10 \log_{10}$ (température de bruit de la station terrienne) $\geqslant$ 19.

(Les valeurs de la densité de puissance nominale pour un angle de 5° avec le faisceau principal sont indiquées dans le Tableau II.)

La plus mauvaise situation de brouillage se présenterait pour le deuxième cas, où un gain de 53 dB correspond à une antenne de 10 m de diamètre. La puissance d'émission nécessaire serait 500 W environ. Avec un avantage de 27 dB (2 MHz) d'étalement, la densité de puissance nominale émise serait 0 dB(W/4 kHz), ce qui établit à 14,5 dB(W/4 kHz), pour $\varphi = 5°$, le rayonnement en dehors de l'axe principal.

Dans le quatrième cas, on indique une valeur similaire pour le rayonnement de densité de puissance en dehors du faisceau principal, mais il convient de prendre en considération d'autres facteurs. Porteuses SCPC – ce sont des porteuses dont le niveau de p.i.r.e. émise par la station terrienne est bas, soit 63,5 dB(W/voie). Etant donné que, normalement, seuls les signaux de télévision ont un taux d'étalement lent (25 ou 30 Hz), on considère

que la puissance porteuse totale est un brouillage par impulsions. Dans ce cas, le rapport puissance porteuse/puissance de brouillage (C/I), à 5°, serait de 22 dB sur la liaison montante et de 13 dB sur la liaison descendante. Bien qu'il n'existe pas de critères de brouillage pour de tels cas, on a adopté dans quelques analyses une valeur de 20 dB pour le rapport global C/I. Reconnaissant la gravité de l'incompatibilité de cette situation, on a conclu qu'il n'est raisonnablement pas possible d'obtenir une protection convenable du fait de l'espacement entre les satellites ou en limitant plus rigoureusement la p.i.r.e., puisque la liaison descendante est l'élément dominant. Une solution consiste à limiter l'emploi des deux types de signaux de telle sorte qu'ils seraient ainsi séparés en fréquence lorsque le service fixe par satellite est impliqué sur la liaison montante et sur la liaison descendante. Une deuxième solution, qui pourrait beaucoup contribuer à résoudre le problème exposé ci-dessus, est une autre méthode de dispersion de l'énergie de la porteuse de télévision par la transformation du signal vidéo, méthode décrite au § 5 de l'Annexe II au Rapport 384.

Deux exemples tirés du système à satellite canadien TELESAT [CCIR, 1974-78g] montrent que, pour une fréquence de 6 GHz et un angle de 5° avec l'axe principal, un niveau de la p.i.r.e. brouilleuse, dans la gamme de 17-18 dB(W/4 kHz) environ, est associé à des émissions sur une seule voie par porteuse provenant d'une antenne de 4 à 5 m de diamètre et à des émissions de télévision provenant d'une antenne de 10 m de diamètre.

En ce qui concerne le quatrième cas, on a fait au Japon des études sur la densité de la p.i.r.e. hors axe par bande de 4 kHz pour la porteuse SCPC-MDP du système INTELSAT et pour les porteuses SCPC-MF et SCPC-MDP du système MARISAT [CCIR, 1978-82e]. Les résultats de ces études permettent de conclure que, dans le cas de transmissions entre stations terriennes du type B du système INTELSAT, la valeur la plus défavorable de la densité de p.i.r.e. hors axe associée aux émissions d'une station terrienne est supérieure de 6 dB aux valeurs spécifiées dans l'Avis 524.

Il faut noter que ces chiffres ne sont donnés qu'à titre d'exemple de systèmes existants. En aucun cas un Avis ne devrait être élaboré en fonction d'un système existant donné; au contraire, les futurs systèmes devraient être conçus de manière à respecter les dispositions de l'Avis définitif.

D'après ce qui précède, on peut provisoirement conclure qu'il est possible de protéger l'utilisation de l'orbite du satellite géostationnaire à environ 6 GHz, même en employant des antennes de station terrienne ayant des diamètres aussi petits que 4 ou 5 m, sous réserve de se conformer aux directives suivantes:

- il convient de planifier avec soin les fréquences pour s'assurer que les transmissions de télévision sur un réseau n'utilisent pas les mêmes fréquences que les transmissions téléphoniques SCPC, sur un réseau fonctionnant avec un satellite voisin;
- dans tous les autres cas, les stations terriennes doivent être conformes aux limites de densité spectrale de la p.i.r.e. en dehors de l'axe du faisceau principal en direction de l'orbite du satellite géostationnaire, précisées dans le troisième paragraphe de la présente section, la valeur de E étant probablement comprise entre 32,0 et 38,5;

TABLEAU II – *Densité minimale de puissance par rapport à l'axe pour des porteuses types*

	MRF-MF, 1332 voies 36 MHz largeur de bande RF	TV-MF	TV-MF Satellite de radiodiffusion (liaison montante)	SCP globale
G/T du satellite (dB (K^{-1}))	-7	-17	0	-17
C/T du trajet montant (dB(W/K))	-125	-137	-134	-154
p.i.r.e. (dBW)	82	80	66	63
Stations terriennes; gain d'antenne émission (dB)	60	53	46	53
Puissance d'entrée RF à l'antenne de la station terrienne (dBW)	22	27	20	10
Puissance spectrale RF à l'entrée de l'antenne de la station terrienne de réception (dB(W/4 kHz))	-8	0	-4	0
$E_{5°}$ (dB(W/4 kHz))(1)	6,5	14,5	10,5	14,5

(1) Rayonnement à $\varphi = 5°$, dans l'hypothèse $32 - 25 \log \varphi$.

– les antennes des stations terriennes doivent être conçues pour un gain minimal des lobes latéraux de 2° à 30° par rapport à l'axe, surtout dans la direction de l'orbite du satellite géostationnaire.

La valeur qu'il convient d'attribuer à E pour une application à des bandes de fréquences autres que celles des 6 GHz doit faire l'objet d'un complément d'étude.

7. Appariage des bandes de fréquences

7.1 *Appariage des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite*

Le Tableau d'attribution des bandes de fréquences, dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, attribue des bandes de fréquences, dans le service fixe par satellite, respectivement pour le sens Terre vers espace et pour le sens espace vers Terre. Toutefois, le Règlement n'exige pas qu'un satellite utilise un couple déterminé de bandes. On pourrait améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences et on pourrait faciliter la coordination des réseaux à satellites si certaines bandes de fréquences étaient appariées.

Pour des raisons d'ordre historique, les bandes des 6 et 4 GHz sont utilisées en commun dans les systèmes existants et projetés du service fixe par satellite, et il est vraisemblable que les bandes des 14 et 11 GHz seront bientôt utilisées dans les mêmes conditions. Les études effectuées jusqu'à présent (voir le point 5 du Programme d'études 2J/4) n'ont pas permis de déterminer quelles sont les associations de bandes les plus favorables du point de vue technique. De ce fait, les résultats déjà obtenus indiquent qu'il n'existe pas de motifs très sérieux d'ordre technique pour préférer un type d'appariage à un autre. Néanmoins, pour le jumelage des bandes de fréquences à utiliser par les stations spatiales du service fixe par satellite, il conviendrait de tenir compte des facteurs techniques suivants:

– Pratique actuelle. Il est souhaitable de conserver le jumelage des bandes de fréquences des liaisons montante et descendante couramment pratiqué dans les réseaux existants et dans les nouveaux réseaux actuellement au stade de la planification.

– Dispositif d'alimentation de l'antenne. Dans beaucoup de stations spatiales et dans la plupart des stations terriennes, un seul système d'antenne sert aussi bien à l'émission qu'à la réception. Le dispositif d'alimentation serait simplifié si le rapport des fréquences entre les liaisons montante et descendante était compris entre 1/1,25 et 1/2.

– Conditions de propagation. Il sera habituellement souhaitable, du point de vue économique, qu'une bande de fréquences assignée à une liaison descendante pour laquelle la réception en diversité n'est pas nécessaire soit jumelée avec une bande de fréquences assignée à la liaison montante soumise aux mêmes conditions de propagation. Les différences dans les avantages relatifs de la polarisation circulaire et rectiligne aux différentes fréquences peuvent aussi conduire à préférer l'appariage de bandes de fréquences dont les fréquences ne sont pas très différentes.

– Largeur de bande attribuée. Il convient que les largeurs de bande occupées sur les liaisons montante et descendante soient égales.

On peut prévoir que la mise en œuvre du principe de l'appariage entraînera les difficultés suivantes:

– Parmi les bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite, quelques-unes seulement sont largement utilisées, et les meilleures manières de se servir des autres ont encore à être étudiées de façon approfondie.

– Des satellites expérimentaux fonctionnant dans plus d'une paire de bandes de fréquences sont déjà en orbite, et il se peut que des stations spatiales similaires, mais opérationnelles, du service fixe par satellite soient lancées bientôt. Il peut être souhaitable que, dans ces satellites, les bandes de fréquences soient entrelacées en totalité ou en partie.

– Les attributions de fréquences au service fixe par satellite sont très différentes d'une des trois régions de l'UIT à une autre.

– Les bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite peuvent être utilisées pour des liaisons avec des satellites d'autres services, par exemple le service de radiodiffusion par satellite et les divers services mobiles par satellite. En pareil cas, une porteuse sera émise en direction d'un satellite dans une bande du service fixe par satellite, mais elle sera retransmise dans une bande attribuée à un service différent, ou vice versa.

Si l'on tient compte de ces difficultés, on peut douter qu'une future Conférence administrative des radiocommunications exige que certaines paires de bandes soient utilisées par les systèmes futurs. Il est néanmoins toujours possible d'établir des principes directeurs, bien que ceux-ci ne puissent pas être appliqués strictement dans tous les cas.

7.2 *Fréquence de conversion pour les satellites à bande étroite*

Certains satellites peuvent se contenter d'une partie seulement de la largeur de bande attribuée. En pareil cas, la coordination entre plusieurs satellites à bande étroite occupant la même portion d'orbite géostationnaire se trouverait facilitée si tous les satellites utilisaient la même fréquence de transposition entre la liaison montante et la liaison descendante.

7.3 *Emploi de plusieurs couples de bandes de fréquences dans les satellites*

Il se peut que, dans le cas de certains réseaux à satellites, il soit avantageux, du point de vue économique comme celui de l'exploitation, d'utiliser plus d'une paire de bandes de fréquences, parce qu'on augmenterait ainsi la largeur de bande effective du réseau. C'est habituellement le moyen le plus économique d'augmenter la capacité de communication d'un réseau. L'emploi de bandes de fréquences multiples n'a pas de répercussion notable sur l'utilisation économique du spectre radioélectrique ou de l'orbite des satellites géostationnaires tant qu'une seule paire de bandes de fréquences est lourdement chargée dans la partie intéressée de l'orbite, mais il présente plusieurs inconvénients lorsque la deuxième paire de bandes de fréquences est également utilisée de façon intense; ces inconvénients sont les suivants:

- la procédure de coordination des assignations de fréquence sera plus compliquée et l'optimisation du choix de l'emplacement sur l'orbite de satellites fonctionnant dans les diverses bandes de fréquences ne sera plus indépendante, de sorte que l'efficacité de ces procédures sera réduite;
- les espacements angulaires requis dans les différentes paires de bandes de fréquences seront probablement différents, d'où la possibilité d'une utilisation complète de l'orbite dans une seule paire de bandes de fréquences.

L'utilisation de plusieurs couples de bandes dans un même satellite du service fixe par satellite ne réduira pas beaucoup l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande et de l'arc d'orbite si les conditions suivantes sont satisfaites:

- les réseaux utilisant des satellites adjacents doivent avoir des caractéristiques similaires;
- les gains et les rapports G/T des antennes des stations terriennes doivent être voisins des valeurs les plus grandes réalisables dans la pratique, dans toutes les bandes utilisées;
- certains paramètres (notamment le type de modulation, la répartition du bruit sur les liaisons montantes et descendantes, la tolérance de bruit de brouillage) des systèmes fonctionnant dans un couple de bandes doivent être spécifiés et ajustés de manière à permettre une utilisation maximale de la largeur de bande et de l'orbite.

Dans un cas non homogène d'utilisation de l'orbite, la perte de capacité serait probablement plus grande, mais on n'aura pas à craindre une diminution importante de l'efficacité d'utilisation de l'orbite, si on n'a pas, sur un certain arc orbital, un nombre excessif de satellites utilisant plusieurs couples de bandes. Néanmoins, l'étude de cette question devra être poursuivie.

Deux méthodes ont été suggérées pour amoindrir les effets de pareille situation dans les cas où elle pourrait conduire à une utilisation inefficace de l'orbite:

- pour certaines configurations à bandes multiples, il est possible d'ajuster les paramètres des systèmes de façon à minimiser la déperdition de capacité globale de l'orbite et du spectre, ce qui correspond généralement à égaliser les espacements angulaires requis dans les diverses bandes;
- il peut être possible de ménager, entre deux satellites multibande, un espace où placer un satellite supplémentaire fonctionnant dans seulement une des paires de bandes de fréquences utilisées par les satellites multibande. Cette méthode peut cependant nécessiter un ajustement des caractéristiques et des paramètres des réseaux à satellites.

Il est recommandé de tenir compte de ces deux méthodes possibles pour la détermination des caractéristiques et des paramètres des réseaux à satellites qui utilisent plus d'une paire de bandes de fréquences.

7.4 *Utilisation de bandes de fréquences du service fixe par satellite pour la connexion avec des satellites utilisés dans d'autres services*

Il faudra étudier les bandes de fréquences préférées, du point de vue technique, pour la connexion avec des satellites fonctionnant dans des services tels que le service mobile maritime par satellite, le service mobile aéronautique par satellite et le service de radiodiffusion par satellite. Dans le premier et dans le deuxième cas, la largeur de bande totale nécessaire pour les liaisons montantes et descendantes est relativement modeste actuellement. La largeur de bande totale qui sera sans doute nécessaire pour la connexion avec les satellites de radiodiffusion, sera beaucoup plus grande que celle que l'on prévoit pour les services mobiles par satellite.

Les bandes de fréquences à adopter sont à l'étude au titre des Programmes d'études 2K/4 et 2M/4. Il suffira d'indiquer ici les principes à appliquer pour permettre une utilisation optimale de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre.

Concernant les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion, le problème principal est le suivant. La CAMR sur la radiodiffusion par satellite (1977) a adopté un plan d'assignations de fréquence pour les Régions 1 et 3 relativement aux liaisons descendantes dans la bande des 12 GHz. S'il fallait déterminer, dans les bandes des liaisons montantes du service fixe par satellite, une largeur de bande homologue destinée à la liaison montante de connexion des satellites de radiodiffusion, elle serait plus ou moins complètement interdite aux liaisons montantes des satellites du service fixe par satellite et la largeur de bande homologue affectée aux liaisons descendantes ne serait pas utilisable aux fins qui lui sont destinées. Inversement, si une largeur de bande n'était pas déterminée à ces fins, d'autres exploitations du service fixe par satellite pourraient utiliser les bandes des liaisons montantes avant que des systèmes de radiodiffusion par satellite ne soient établis, et la mise en œuvre du plan de radiodiffusion par satellite rencontrerait des difficultés.

Les solutions suivantes ont été suggérées à l'égard des liaisons montantes de connexion vers les satellites de radiodiffusion:

- affecter aux liaisons montantes une bande de fréquences appropriée qui a été déjà attribuée au service fixe par satellite, mais qui n'a pas d'homologue pour les liaisons descendantes; une telle circonstance varierait d'une région à une autre. Ou encore, la CAMR-79 pourrait attribuer une nouvelle bande de fréquences à cet effet;
- utiliser pour les liaisons montantes de connexion vers les satellites de radiodiffusion des bandes de fréquences qui ont été déjà attribuées aux liaisons descendantes du service fixe par satellite, en s'arrangeant pour que les contraintes ainsi imposées aux satellites de ce dernier service soient modérées, bien que cette utilisation puisse imposer des contraintes aux satellites de radiodiffusion. A titre d'exemple, des bandes avoisinant 11, 12 ou 18 GHz pourraient être utilisées de cette façon.

Il serait très souhaitable de déterminer, pour les liaisons montantes de connexion vers les satellites de radiodiffusion, des bandes de fréquences d'une largeur égale à celle des bandes utilisées pour les liaisons descendantes homologues. Si cela n'était pas faisable, on devrait envisager l'emploi de méthodes de réduction des largeurs de bande, par exemple des méthodes de modulation à grande densité sur les trajets montants, en équipant d'un processeur le répéteur des stations spatiales.

Il sera sans aucun doute nécessaire de déterminer des bandes de fréquences pour établir des connexions entre des stations terriennes côtières et des satellites de services mobiles par satellite occupant n'importe quelle position sur l'orbite. Pour que ces bandes de fréquences puissent être utilisées efficacement dans d'autres positions orbitales, il est souhaitable qu'elles soient disponibles aussi pour des réseaux du service fixe par satellite. Il faudrait s'efforcer de faire en sorte qu'il n'y ait pas une trop grande incompatibilité entre les caractéristiques des émissions en usage dans le service mobile et celles du service fixe par satellite, afin de ne pas nécessiter un espacement excessif entre satellites géostationnaires.

Note du Directeur du CCIR (Voir § 2 du Rapport 952):

La CAMR-79 a examiné le problème des attributions des bandes de fréquences aux liaisons de connexion des satellites de radiodiffusion fonctionnant dans la bande des 12 GHz. Certaines bandes de fréquences ont été attribuées à cet effet au service fixe par satellite (Terre vers espace), mais elles ont été limitées aux liaisons de connexion des satellites de radiodiffusion. Il s'agit des bandes suivantes:

10,7-11,7 GHz: dans la Région 1 seulement, utilisée en partage avec le service fixe, le service fixe par satellite (espace vers Terre) et le service mobile (sauf aéronautique);

14,5-14,8 GHz: utilisée en partage avec les services fixe et mobile. Cette utilisation est réservée aux pays extérieurs à l'Europe et à Malte;

17,3-18,1 GHz: la moitié supérieure de cette bande est utilisée en partage par les services fixe et mobile et par le service fixe par satellite (espace vers Terre).

En outre, il convient de noter que toute bande du service fixe par satellite (Terre vers espace) peut aussi être utilisée pour les liaisons de connexion, moyennant l'application des procédures de coordination ordinaires, à l'exception de la bande 14,0-14,5 GHz pour laquelle l'utilisation de liaisons de connexion au service de radiodiffusion par satellite est réservée aux pays extérieurs à l'Europe et à Malte (voir aussi la Rapport 561).

8. Utilisation homogène et hétérogène de l'orbite-spectre

8.1 *Utilisation homogène de l'orbite*

8.1.1 *Homogénéité du système*

On obtiendrait l'utilisation la plus efficace de l'orbite si tous les satellites placés sur l'orbite géostationnaire, desservant la même zone géographique et utilisant les mêmes bandes de fréquences, avaient les mêmes caractéristiques, autrement dit s'ils formaient un ensemble homogène. Toutefois, en pratique, les systèmes à satellites présenteront des différences.

Considérons deux systèmes à satellites, A et B, dans lesquels les positions orbitales des satellites sont adjacentes. Si A et B ont des caractéristiques très différentes (par exemple, la sensibilité des récepteurs des satellites et la p.i.r.e. sur la liaison descendante, ou les caractéristiques des stations terriennes), l'espacement angulaire nécessaire pour protéger A contre les brouillages causés par B peut être différent de l'angle nécessaire pour protéger B contre A. En pratique, il faudra choisir le plus grand de ces deux angles. La mesure dans laquelle cela peut nuire à l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires dépend des nombreux facteurs de réalisation des systèmes à satellites dont les positions orbitales avoisinent celles de A et B. On peut obtenir une utilisation plus efficace de l'orbite si l'on tient compte des facteurs de non-homogénéité au stade de la conception des systèmes à satellites. Les paramètres qui devraient particulièrement retenir l'attention sont la p.i.r.e. du satellite, le facteur de qualité des stations terriennes (G/T) et l'immunité relative du système de modulation à l'égard des brouillages.

La complexité du problème de la capacité orbitale se trouve encore accrue par la tendance de plus en plus marquée à utiliser des antennes de satellite à faisceau très étroit. C'est là un fait dont il faut tenir compte.

8.1.2 *Etude paramétrique d'un ensemble homogène*

On a établi comme suit un modèle de brouillage entre systèmes formant un ensemble homogène:

- l'orbite des satellites géostationnaires est entièrement occupée par des satellites équidistants;
- les émissions sont à modulation de fréquence, avec des bandes de base d'une capacité au moins égale à 240 voies en téléphonie MRF;
- les faisceaux de rayonnement des antennes de tous les satellites couvrent toute la surface terrestre; ces antennes ont les mêmes caractéristiques d'émission et de modulation et elles émettent le même type de signal sur la même fréquence porteuse nominale (partage du même canal);
- toutes les stations terriennes sont identiques: les caractéristiques des lobes latéraux des antennes sont conformes aux indications contenues dans l'Avis 465;
- la propagation se fait par temps clair;
- on considère uniquement ce qui se passe sur le trajet descendant.

Sous réserve de ces restrictions, dont certaines peuvent être assouplies, tous les paramètres peuvent varier librement et, dans cette mesure, le modèle homogène donne, de façon intuitive, un grand nombre d'indications valables sur la nature des divers compromis à adopter.

La Fig. 3 montre comment l'espacement minimal des satellites varie en fonction du bruit de brouillage, N_I. L'espacement des satellites a été normalisé pour N_I = 1000 pW0p, valeur préconisée actuellement dans l'Avis 466. De même, la Fig. 4 montre comment l'espacement minimal des satellites varie en fonction des dimensions des antennes des stations terriennes. Dans ce cas, l'espacement est normalisé pour $D/\lambda = 100$ où D est le diamètre de l'antenne et λ la longueur d'onde utilisée.

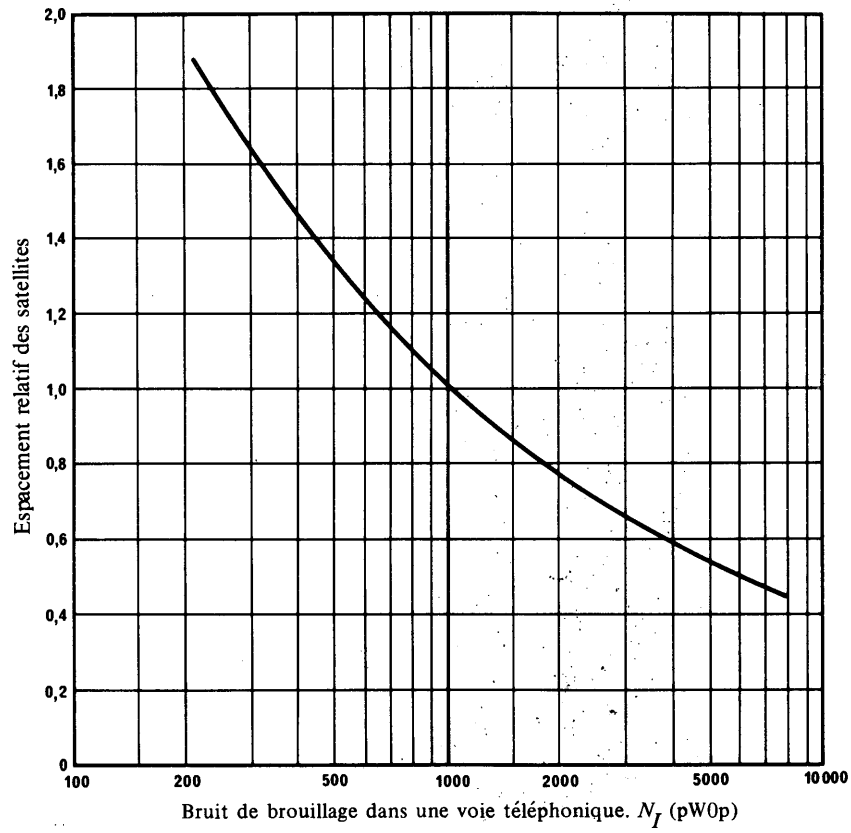


FIGURE 3 – *Espacement des satellites en fonction du bruit de brouillage*

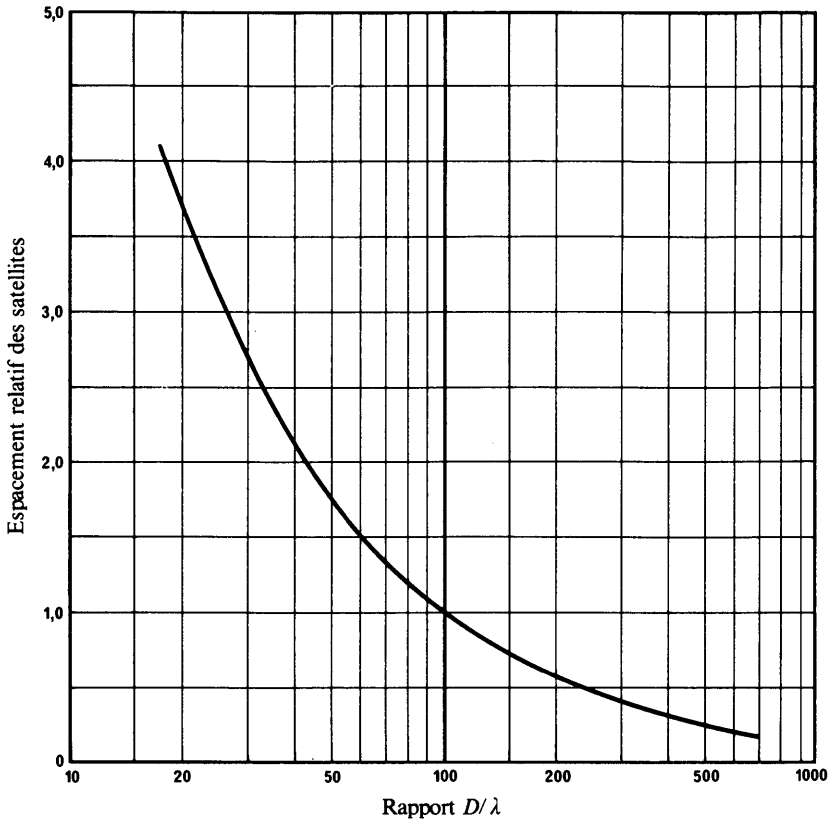


FIGURE 4 — *Espacement des satellites en fonction du diamètre de l'antenne de la station terrienne*

L'influence des caractéristiques de modulation est illustrée dans la Fig. 5. On a porté en abscisse n, nombre de voies téléphoniques par MHz, qui dépend de l'indice de modulation. Comme pour les courbes précédentes, les ordonnées représentent la variation correspondante de l'espacement, par rapport au cas où l'on a un indice de modulation efficace égal à 1,0. D'autre part, la Fig. 5 montre que, lorsque l'on entrelace les plans de fréquences entre deux satellites adjacents, on obtient un espacement nettement plus satisfaisant. Il convient de noter cependant que, pour de petits indices de modulation, la transmission dans une même voie ne correspond plus au plan de fréquences le plus défavorable; en fait, des écarts relativement petits par rapport à cette transmission, en particulier lorsque la différence entre les fréquences porteuses est inférieure à la largeur de la bande de base, peuvent provoquer une forte augmentation du brouillage.

La Fig. 3 représente la variation du bruit de brouillage, sans cependant indiquer la variation correspondante de la p.i.r.e. qui est nécessaire pour que le bilan du bruit total (bruit de brouillage plus bruit thermique) soit maintenu à une valeur spécifiée. Une étude [CCIR, 1978-82f] montre qu'il est possible d'obtenir une réduction notable de l'espacement des satellites avec des valeurs de p.i.r.e. augmentées; ainsi, la réduction du bruit interne du système peut être remplacée, dans le bilan de bruit total du système, par une augmentation du brouillage entre réseaux. La réduction d'espacement que l'on pourra obtenir sera légèrement moins importante si le bruit d'intermodulation présent dans les réseaux est important. La relation entre la p.i.r.e. augmentée et la réduction de l'espacement relatif des satellites θ/θ_0 (où θ_0 est l'espacement avant l'augmentation de la p.i.r.e.) est représentée dans la Fig. 6 qui considère deux cas: l'un sans bruit d'intermodulation et l'autre avec un bruit d'intermodulation de 20%. L'augmentation de la p.i.r.e. de satellite et la réduction d'espacement de satellite, telles qu'elles ont été décrites ci-dessus, supposent une augmentation du rapport du brouillage entre réseaux à la somme du bruit et du brouillage total du réseau. Ce rapport, r, est représenté dans la Fig. 6 en fonction de l'augmentation de la p.i.r.e., pour les deux cas considérés.

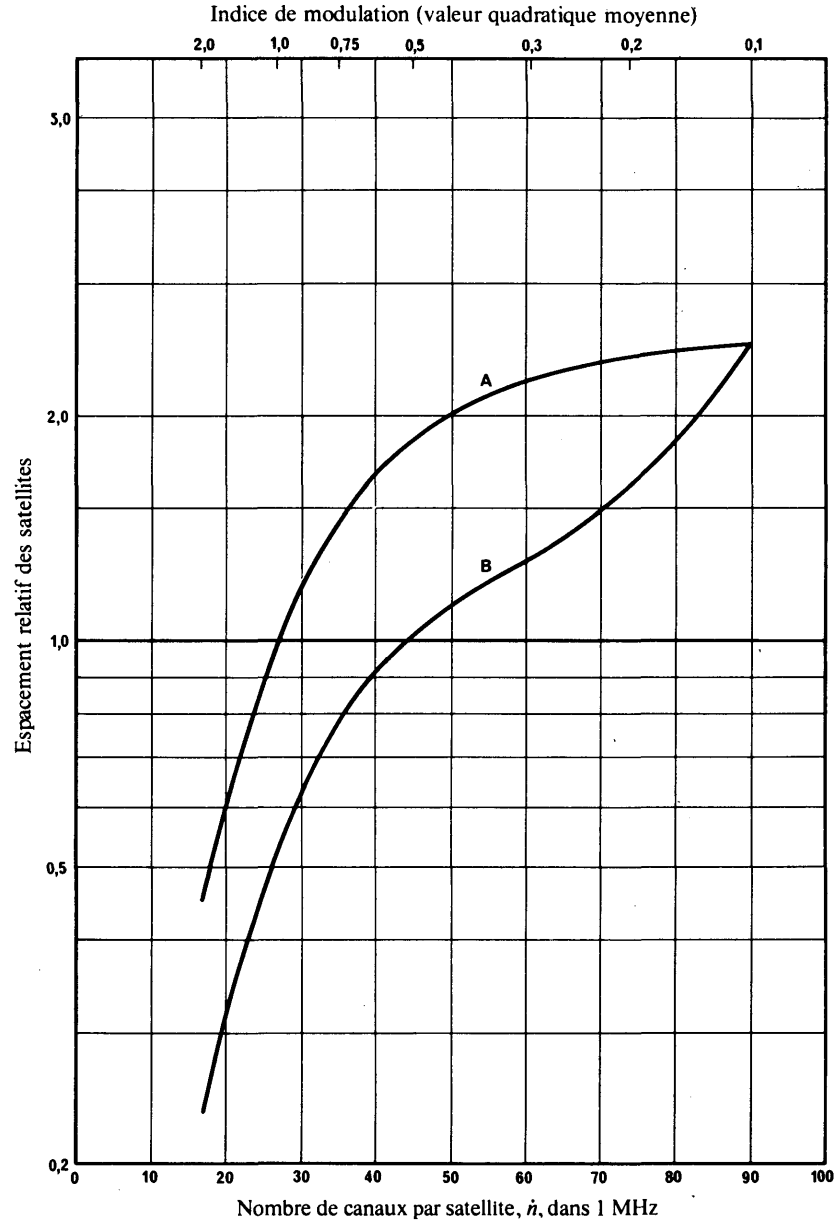


FIGURE 5 — *Espacement des satellites en fonction de l'indice de modulation*

A: Même canal
B: Entrelacement

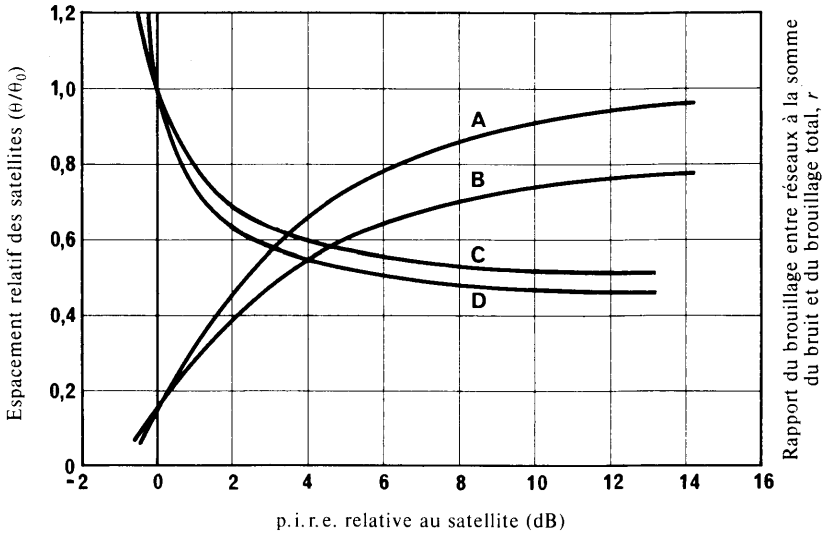


FIGURE 6 – *Espacement relatif des satellites et variation de r en fonction de la p.i.r.e. des satellites*

Courbes A : variation de r sans bruit d'intermodulation
B : variation de r avec 20% de bruit d'intermodulation
C : variation de l'espacement orbital avec 20% de bruit d'intermodulation
D : variation de l'espacement orbital sans bruit d'intermodulation

Il convient cependant de noter qu'il s'agit là d'une solution à long terme qui met en jeu tous les satellites d'une portion donnée de l'orbite et qui est applicable seulement après la mise en œuvre de nouveaux satellites de grande puissance et qu'elle peut avoir un inconvénient économique considérable. C'est pourquoi il convient tout d'abord d'explorer d'autres techniques permettant une meilleure utilisation de l'orbite.

Une autre manière d'étudier le problème de la variation des caractéristiques du système pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite consisterait à conserver des valeurs fixes de la p.i.r.e. lorsqu'on fait varier l'espacement. Ces relations sont illustrées par la Fig. 7 dans laquelle η, nombre de voies téléphoniques par degré d'arc orbital et par MHz, a été utilisé comme mesure significative de l'utilisation de l'orbite et du spectre. On a choisi comme paramètre le rapport porteuse/bruit thermique (CNR); ce paramètre est en effet d'une utilisation plus commode que la p.i.r.e. tout en étant relié à celle-ci d'une façon bien connue. Cette figure contient aussi les courbes d'égales valeurs du rapport bruit thermique/bruit de brouillage, lorsque la somme des puissances de ces bruits est de 7500 pW.

Les Fig. 3 à 7 permettent de formuler un certain nombre de conclusions. Bien entendu, certaines de ces conclusions s'appliquent uniquement au modèle de système homogène MRF-MF, mais, moyennant certaines précautions, elles peuvent être étendues à des cas plus généraux.

La Fig. 3 montre tout d'abord que, toutes choses égales par ailleurs, l'espacement des satellites varie en raison inverse de l'allocation de bruit dû au brouillage. De plus, ces deux grandeurs varient rapidement; par exemple, lorsque N_I passe de 250 pW à 7500 pW, soit un rapport de 1 à 30, la valeur de $\Delta\theta$ se trouve divisée par 4. Ainsi, à mesure que N_I se rapproche du niveau de bruit total, on pourra avoir des valeurs de plus en plus petites de $\Delta\theta$ pour faire face à des valeurs de plus en plus grandes du bruit dû au brouillage.

D'autre part, la Fig. 4 montre aussi que l'espacement des satellites varie en raison inverse des dimensions de l'antenne des stations terriennes; la vitesse de cette variation est relativement faible pour des antennes de dimensions relativement importantes ($D/\lambda > 100$), mais augmente dans le cas d'antennes plus petites.

Les courbes de la Fig. 5 montrent que, toutes choses égales par ailleurs, l'espacement des satellites varie en raison inverse de l'indice de modulation; on obtient une correspondance sensiblement biunivoque lorsque l'indice de modulation est élevé. La capacité de transmission de chaque satellite diminue sensiblement lorsque l'indice de modulation croît, mais on obtient néanmoins une augmentation de la capacité totale de l'orbite du fait qu'il est alors possible d'utiliser plus de satellites. Il s'ensuit que, théoriquement, l'emploi d'un indice de modulation élevé constitue un moyen efficace pour accroître l'utilisation de l'orbite dans le cas de systèmes MRF-MF.

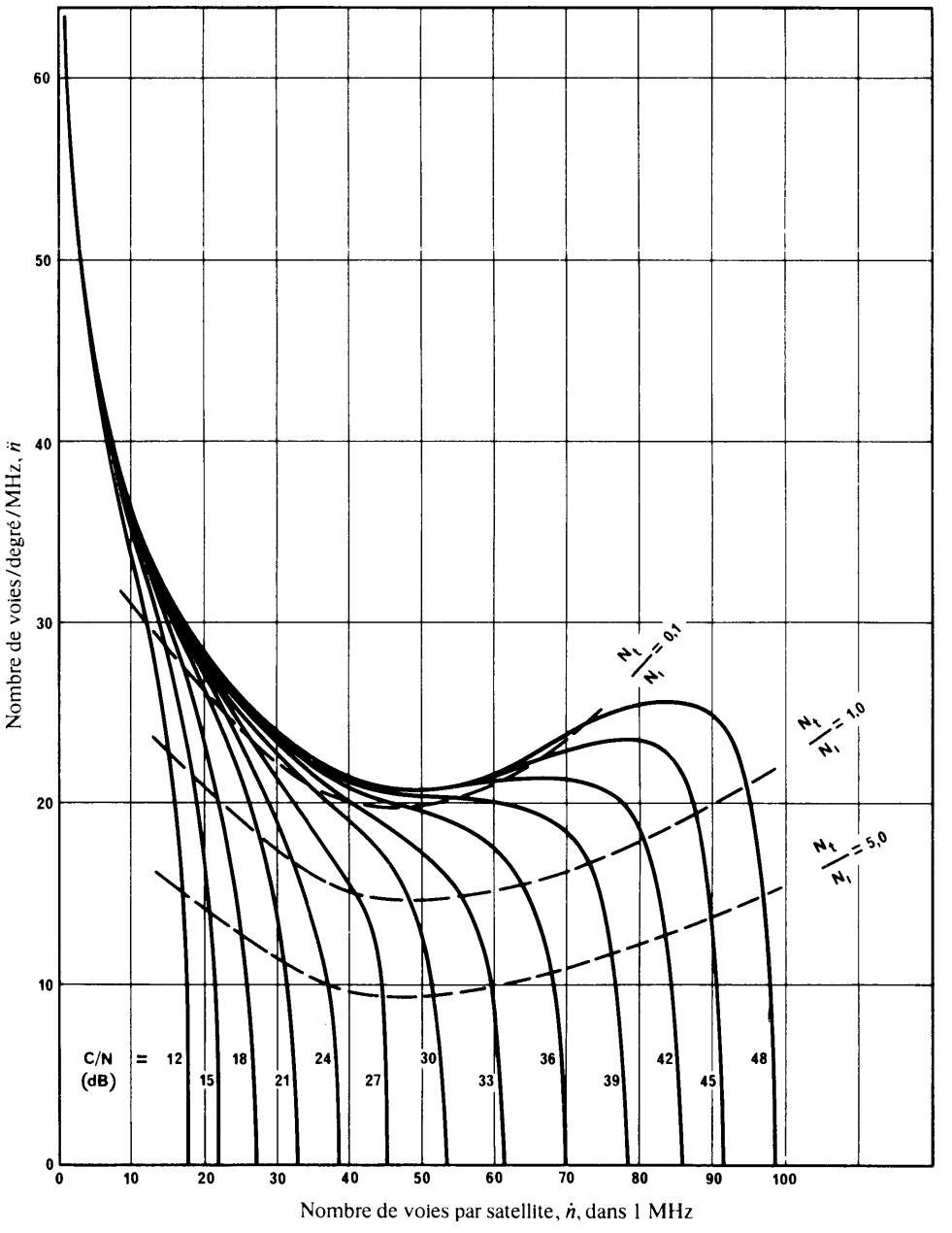


FIGURE 7 – *Utilisation de l'orbite et du spectre en fonction du nombre de voies par satellite*

($D/\lambda = 300$, $N_t + N_I = 7500$)

(On suppose que les porteuses brouilleuses sont dans la même voie)

Avec la mesure de l'efficacité d'utilisation de l'orbite et du spectre qui est adoptée ici, à savoir le nombre de voies/degré/MHz, la Fig. 7 montre que cette efficacité augmente généralement avec l'indice de modulation, ce qui corrobore la remarque précédente. Il convient de noter cependant qu'un indice de modulation élevé correspond à des satellites de faible capacité fonctionnant dans une largeur de bande fixe. Il faut donc accroître le nombre des satellites si l'on veut obtenir une capacité de trafic totale, ce qui va à l'encontre des exigences de rentabilité. Il y a lieu de faire observer en outre que dans une certaine gamme d'indices de modulation et pour un rapport porteuse/bruit relativement élevé, les variations de $\ddot{n}$ sont relativement faibles; dans cette gamme, on peut donc choisir la valeur souhaitable de la capacité de transmission des satellites, sans compromettre l'efficacité d'utilisation de l'orbite.

Il convient de noter aussi qu'une diminution du rapport porteuse/bruit s'accompagne d'une diminution de la gamme des valeurs possibles de $\ddot{n}$. Cela s'explique de la façon suivante: pour chaque valeur du rapport porteuse/bruit, il existe une valeur de $\ddot{n}$ pour laquelle le bruit thermique (N_t) approche de la valeur totale admissible du bruit (N_T); à ce niveau, tout bruit de brouillage est inadmissible, ce qui exigerait un espacement «infini». C'est ce qui explique que l'on ait une courbure vers le bas et que les courbes aient un aspect asymptotique. Enfin, on constate aussi, comme le laissait prévoir la Fig. 3, que l'on peut compter sur une plus grande capacité totale de l'orbite si un pourcentage de plus en plus grand du bilan de bruit est attribué au brouillage.

8.2 *Utilisation hétérogène de l'orbite*

8.2.1 *Etudes faites sur l'espacement des satellites pour des systèmes ayant des caractéristiques particulières*

On a fait des études dans lesquelles on a calculé l'espacement qu'il doit y avoir entre des satellites et la capacité de transmission que peut atteindre un réseau, pour des systèmes ayant diverses caractéristiques choisies arbitrairement, dans l'hypothèse que les antennes des stations terriennes sont conformes aux dispositions de l'Avis 465.

Une étude [CCIR,1978-82g] montre que, de façon générale, les différences dans la capacité de la bande de base des réseaux MF-AMRF ne devraient pas être une source importante d'inhomogénéité. Dans cette étude, les distances de séparation requises entre deux réseaux à satellite identiques de la classe INTELSAT-IV-A dont les stations terriennes ont des valeurs de G/T d'environ 40 dB(K^{-1}) ont été calculées pour divers couples de types de trafic dans la même voie (divers trafics AMRF multi-canaux et trafic de télévision MF).

Les distances de séparation nécessaires pour respecter la clause du brouillage maximum par une source unique de 600 pW0p varient de 1° à 3,27° pour diverses combinaisons de trafic MF-AMRF et de 1,57° à 4,0° entre divers types de trafic MF-AMRF et un trafic TV-MF analogique à balayage lent. Il semble en ressortir que, dans le cas de systèmes AMRF-MF, l'inhomogénéité due aux variations du type de trafic est moins importante que les différences entre caractéristiques des antennes des stations terriennes ou des stations spatiales.

Mais, selon la même étude, la distance de séparation dans le cas d'un trafic SPADE avec une seule voie par porteuse et des porteuses à forte densité spectrale, y compris des porteuses TV-MF à balayage lent, pourrait atteindre 6°.

D'autres études sont signalées dans le Rapport 559. Il est possible d'en résumer les résultats comme suit:

- avec un rapport G/T de 40 dB(K^{-1}) environ pour des stations terriennes fonctionnant en MDP ou en MRF-MF à grande excursion de fréquence, les satellites situés sur un arc d'orbite occupé de façon homogène doivent présenter entre eux un espacement couramment compris entre 1,5 et 3,0°;
- avec un rapport G/T de 28 dB(K^{-1}) environ pour les stations terriennes, les satellites doivent avoir un espacement de 3 ou 4° si les stations terriennes fonctionnent en MF à grande excursion de fréquence, mais de 1,5° seulement si elles fonctionnent en MDP;
- pour des stations terriennes fonctionnant en MF à faible excursion de fréquence, les espacements des satellites peuvent être de deux à trois fois plus grands qu'en MF à grande excursion;
- si deux satellites adjacents desservent, l'un des stations terriennes ayant un G/T égal à 40 dB(K^{-1}) et l'autre des stations terriennes ayant un G/T égal à 28 dB(K^{-1}), l'espacement à maintenir entre eux peut être de deux à trois fois plus grand que la valeur requise pour l'un ou l'autre de leurs réseaux, dans l'hypothèse où ces satellites seraient situés sur un arc d'orbite occupé de façon homogène.

8.2.2 *Optimisation de l'utilisation hétérogène de l'orbite*

Les réseaux à satellites qui fonctionneront dans la même bande de fréquences et dont les positions sur l'orbite des satellites géostationnaires seront adjacentes auront, en général, des caractéristiques dissemblables. Cette situation se présentera dans les bandes attribuées au service fixe par satellite, lorsque celui-ci les utilisera en partage avec d'autres services, tels que le service de radiodiffusion par satellite. Il semble probable que ce problème ne soit pas justiciable d'une solution analytique applicable à des

ensembles arbitraires de satellites. Pour de telles situations, le mieux semble être de résoudre le problème cas par cas – en analysant différentes combinaisons de satellites afin de déterminer celle qui est la plus appropriée – ce qui signifie qu'un traitement par ordinateur est tout à fait indiqué. Dans [CCIR, 1970-74h, i et j] on trouvera quelques exemples de résultats obtenus en recourant à ces méthodes d'informatique.

La méthode analytique en question a été appliquée à quelques-unes des caractéristiques préliminaires de plusieurs systèmes nationaux à satellites, en projet aux Etats-Unis d'Amérique. Certaines caractéristiques du système national canadien sont également examinées, bien qu'il ne soit pas tenu compte de tous les paramètres d'exploitation actuels de ce système (y compris le cas critique de l'accès multiple par répartition en fréquence). Avec les hypothèses indiquées, il a été démontré que, en dépit d'un positionnement approprié des satellites, il est impossible d'obtenir, pour les satellites de cet ensemble hétérogène, des niveaux de brouillage acceptables avec un espacement uniforme de 3°, même si l'on recourt à la discrimination par polarisation. Il devrait cependant être possible, grâce à une coordination judicieuse, d'atteindre un espacement moyen d'environ 3° pour cet ensemble de satellites. Dans la mesure où les paramètres réels du système seraient différents des paramètres supposés, les résultats devraient faire l'objet d'un nouvel examen, cas par cas. Ce résultat est comparable à une situation idéale où l'on pourrait obtenir un espacement orbital de 2 à 3° avec un ensemble homogène de réseaux à modulation de fréquence et multiplexage par répartition en fréquence, pourvus d'antennes de station terrienne d'au moins 10 m de diamètre.

L'utilisation d'une technique de programmation non linéaire pour l'optimisation des positions orbitales des satellites est décrite dans le doc. [CCIR, 1978-82h] et dans la réf. [ITO et autres, 1979]. Le problème à résoudre consiste à réduire au minimum l'arc total occupé par un nombre donné de satellites rangés dans un ordre donné, en maintenant un rapport de protection donné (qui peut différer d'un satellite à l'autre), cela en présence de brouillage dans la même voie produit par tous les autres satellites. L'ordre des satellites n'est pas modifié au cours de la procédure d'optimisation.

Des méthodes analytiques telles que celles qui sont décrites dans ces documents offrent des moyens valables pour optimiser la mise en place dans des zones encombrées de l'orbite des satellites géostationnaires de satellites faisant partie de réseaux ayant des caractéristiques dissemblables, qu'ils appartiennent au même service ou à des services différents; aussi l'emploi de ces méthodes est-il recommandé dans les cas appropriés. Il faut cependant noter qu'il est plus facile d'établir un plan d'utilisation optimale de l'orbite lorsque tous les systèmes en sont encore au stade de la planification, plutôt que de devoir remanier ultérieurement ce plan pour tenir compte de nouveaux besoins imprévus.

Une méthode simple de présentation des calculs de brouillage de deux systèmes à satellites adjacents est décrite dans l'Annexe I.

8.3 *Etudes de méthodes pratiques permettant une utilisation efficace de l'orbite et du spectre*

Les études consacrées à la mise au point de méthodes pratiques d'utilisation efficace de l'orbite et du spectre des satellites géostationnaires dans des réseaux de caractéristiques très différentes ont donné les résultats indiqués ci-dessous:

8.3.1 *Réseaux du service fixe par satellite utilisant des antennes de stations terriennes à faible gain et à gain élevé*

L'utilisation de la largeur de bande et de l'arc orbital d'un ensemble de réseaux à satellites est fonction, à la fois de l'utilisation de la largeur de bande et des écarts angulaires minimaux requis entre les satellites pour respecter des critères de brouillage déterminés. Si l'on admet que l'utilisation de la largeur de bande n'est pas une variable, on peut obtenir une indication de l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande et de l'arc orbital à partir de l'écart angulaire requis entre les divers satellites et de l'arc orbital occupé par l'ensemble des satellites.

Les écarts angulaires nécessaires entre satellites dépendent d'un grand nombre de paramètres de réseaux, par exemple les diagrammes de rayonnement des antennes, les modes d'accès multiple, les gains des répéteurs de satellite, la dispersion de l'énergie, etc.

Le document [CCIR, 1974-78h] fait les hypothèses ci-après:

– certains satellites ne desservent que des stations terriennes dotées de grandes antennes, d'autres seulement des stations terriennes dotées de petites antennes;

– les gains des répéteurs des satellites peuvent être réglés de manière à faire varier les rapports de bruit liaison descendante/liaison montante afin d'abaisser le niveau de brouillage total du système, et

– les répéteurs des satellites fonctionnent dans un mode quasi linéaire.

Ainsi, on peut formuler les conclusions suivantes:

a) Le gain des antennes des stations terriennes tend à devenir le facteur prédominant dans la détermination de l'espacement orbital nécessaire. A une différence de gain de 20 dB peut correspondre un taux d'utilisation orbitale de 6,3/1.

b) L'espacement orbital nécessaire entre les satellites dépend du brouillage causé par le réseau avec petites antennes de stations terriennes au réseau avec grandes antennes. Le brouillage en sens inverse peut être moins fort qu'entre deux réseaux comprenant des stations terriennes à grande antenne.

c) Il sera peut-être possible de réduire l'espacement orbital des satellites en choisissant convenablement la valeur du rapport des bruits liaison montante/liaison descendante, dans des réseaux utilisant des satellites adjacents. Il est important, à cet égard, de pouvoir commander le gain du répéteur du satellite.

d) Il est possible d'améliorer l'utilisation globale de l'orbite en isolant les réseaux à satellites avec petites antennes dans les stations terriennes par rapport aux réseaux avec grandes antennes par le regroupement des satellites, surtout si on prévoit une attribution plus importante de bruit de brouillage pour les réseaux avec petites antennes. Cependant, cette méthode n'est efficace que si chaque groupe contient au minimum plusieurs satellites; il faudra utiliser d'autres méthodes pour réduire à un minimum l'espacement des satellites requis dans chaque groupe, afin que l'arc orbital total nécessaire pour chaque groupe ne soit pas trop grand.

e) Une autre façon d'améliorer peut-être l'utilisation globale de l'orbite consisterait à faire succéder sur l'orbite des satellites dont les zones de couverture d'antenne ne se chevauchent pas.

Il y a lieu de noter que l'on a mis au point des systèmes à satellites qui ne satisfont pas aux hypothèses faites plus haut. Les conclusions *a), b), c)* et *d)* ne s'appliquent pas nécessairement à ces systèmes.

8.3.2 *Utilisation de l'orbite lorsqu'une bande est partagée par des satellites de différents services*

Le service de radiodiffusion par satellite et le service fixe par satellite dans la Région 2 de l'UIT se partagent une attribution de fréquence pour la liaison descendante à 12 GHz; ceci est un cas particulier d'utilisation non homogène. Dans le service de radiodiffusion par satellite, des zones de service bien définies et des antennes de réception aux stations terriennes relativement petites imposent des contraintes supplémentaires sur la souplesse de configuration des systèmes spatiaux, une fois mis en œuvre. Cependant, on peut améliorer notablement l'utilisation de l'orbite, en adaptant réellement certains facteurs techniques au moyen d'une coordination à un stade suffisamment précoce de la planification des réseaux.

L'effet de ces facteurs sur l'utilisation de l'orbite est examiné dans le Rapport 561 et dans [CCIR, 1974-78i]. Ce dernier projet de Rapport utilise les termes suivants, au cours de son étude du partage entre les services fixes par satellite et de radiodiffusion par satellite:

Division du spectre: Méthode de partage dans laquelle chaque service peut utiliser la totalité de l'arc orbital; par contre, chaque service ne peut utiliser qu'une partie, à lui attribuée, de la bande de fréquences.

Division de l'orbite: Méthode de partage dans laquelle chaque service peut utiliser la totalité de la bande de fréquences, l'utilisation des positions orbitales des satellites devant par contre faire l'objet d'une coordination.

Facteur d'utilisation du service: Pour l'un ou l'autre service, rapport de la capacité que ce service pourrait fournir s'il utilisait une fraction déterminée de la largeur de bande et de l'arc orbital disponibles, à la capacité totale qu'il fournirait s'il bénéficiait d'une attribution exclusive.

Facteur d'utilisation: Somme des deux facteurs d'utilisation du service.

On trouvera ci-après le résumé des conclusions tirées de ces études.

Le service fixe par satellite et le service de radiodiffusion par satellite peuvent partager de façon équitable et effective la portion du spectre-orbite disponible à 12 GHz. Les méthodes de division de l'orbite et de division du spectre, appliquées toutes les deux, permettent d'obtenir des facteurs d'utilisation voisins de 100%, ce qui indique que le partage ne compromet pas de façon notable l'utilisation de l'orbite-spectre.

Avec la division du spectre, il n'existe pas de brouillage entre services, de sorte que, pour chaque service, le facteur d'utilisation est presque proportionnel à la fraction du spectre attribuée à ce service et le facteur total d'utilisation est toujours voisin de 100%. On peut diviser le spectre entre les services dans la proportion que l'on désire, indépendamment des caractéristiques des systèmes à satellites.

Avec la division de l'orbite, le brouillage entre services est maîtrisé grâce à un espacement soigneusement étudié des satellites sur l'orbite, et la mise en place que l'on préférera pour les satellites dépend des paramètres des systèmes de partage en ce qui concerne à la fois le matériel et le signal. Mais ce n'est qu'en dimension que le problème diffère de celui qui consiste à trouver des espacements compatibles pour le partage au sein d'un même service et, pour n'importe quelle combinaison des systèmes, on peut trouver une mise en place des satellites pour laquelle le facteur d'utilisation auquel conduit la méthode de division du spectre avoisine 100%. Pour certaines combinaisons des systèmes, l'utilisation totale peut dépasser notablement 100%, bien qu'en de pareils cas il existe une limitation de la taille relative des fractions d'orbite qui peuvent être attribuées.

Si on la compare avec une méthode de division de l'orbite utilisant les mêmes types de systèmes, la division du spectre impose une pénalisation économique, sauf s'il s'agit de satellites à utilisations multiples. A cette exception près, chaque service doit utiliser plus de satellites pour obtenir la même capacité totale en voies. Puisqu'une méthode de division de l'orbite peut conduire à des facteurs d'utilisation également élevés, et dans certains cas plus élevés, on en conclut qu'il faut préférer la division de l'orbite à la division du spectre.

La disposition des satellites qui caractérise la méthode préférée de division de l'orbite pour un ensemble donné de systèmes dépend du degré auquel ces systèmes manquent d'homogénéité. Lorsque les p.i.r.e. des satellites, les diamètres des antennes des stations terriennes ou les indices de modulation du signal sont complètement différents, l'utilisation totale la plus élevée est procurée par une mise en place «groupée» dans laquelle plusieurs satellites du système le moins puissant sont logés entre les satellites adjacents du système le plus puissant. Lorsque les paramètres de système sont plus homogènes, la disposition des satellites devient moins critique, mais, même en pareil cas, des facteurs d'utilisation quelque peu plus élevés sont généralement obtenus en groupant ensemble les satellites du même genre et en réduisant au minimum le nombre des voisinages entre groupes de satellites de types différents.

8.4 *Restrictions imposées à certaines caractéristiques des systèmes*

Les études ont montré qu'il y a intérêt à diviser le spectre ou l'orbite, ou à utiliser une méthode équivalente afin de réduire l'hétérogénéité des réseaux qui peuvent se causer des brouillages mutuels; il faut donc examiner des méthodes permettant d'appliquer ces principes.

Une des solutions proposées consiste à imposer des restrictions à certaines caractéristiques des systèmes, dans quelque-unes des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite. Ces restrictions devraient être conçues de manière que les ingénieurs aient la plus grande liberté possible dans l'optimisation de leurs systèmes, pour autant qu'ils parviennent à obtenir des réductions significatives de la non-homogénéité. Par exemple, il a été suggéré [CCIR, 1974-78j] que des limites pourraient être appliquées aux caractéristiques suivantes:

Caractéristique A: p.i.r.e. maximale de la liaison montante par unité de largeur de bande dans la direction de l'orbite des satellites géostationnaires, rayonnée par la station terrienne dans une direction faisant un angle θ avec l'axe du faisceau principal.

Caractéristique B: Sensibilité de la liaison montante définie comme minimum de la densité spectrale surfacique de la puissance brouilleuse qui correspond, sur l'orbite des satellites géostationnaires, à la valeur de brouillage unique maximale recommandée dans une voie.

Caractéristique C: Maximum de la densité spectrale de puissance surfacique produite à la surface de la Terre par les émissions de satellite.

Caractéristique D: Sensibilité de la liaison descendante définie comme minimum de la densité spectrale surfacique de la puissance brouilleuse à la surface de la Terre qui arrive dans une direction faisant un angle θ avec la direction du signal utile et qui correspond à la valeur de brouillage unique maximale recommandée dans une voie.

8.4.1 Si on restreignait les caractéristiques A, B, C et D à une gamme de valeurs suffisamment étroite pour entraîner une amélioration significative de l'efficacité d'utilisation de l'orbite/spectre, on se trouverait dans l'obligation de modifier substantiellement les caractéristiques de base de certains réseaux. De même, la conception des systèmes nouveaux serait soumise à de sérieuses restrictions.

8.4.2 La segmentation de l'orbite permettrait sans doute de réduire la non-homogénéité sans restreindre dans la même proportion les caractéristiques des systèmes. Cependant, il est probable qu'elle imposerait des restrictions au choix de l'emplacement des satellites sur l'orbite. De plus, à chacune des jonctions entre segments d'orbite auxquels sont affectées différentes gammes de caractéristiques, il existerait probablement un arc sur lequel on ne pourrait placer aucun des satellites appartenant à l'une ou l'autre catégorie sans risque excessif de brouillages entre réseaux. L'impossibilité d'utiliser de tels arcs réduirait sensiblement les avantages que l'on retirerait de la réduction de la non-homogénéité à l'intérieur des segments d'orbite. On a noté de plus que certains réseaux à satellite desservent des stations terriennes voisines des limites de la couverture mondiale; leurs arcs de service sont donc très petits, aussi doit-on les placer en des positions déterminées avec précision par des facteurs géographiques.

8.4.3 La segmentation du spectre est sans doute de nature à permettre aussi une réduction significative de la non-homogénéité à l'intérieur des segments; elle entraînerait cependant une réduction de la largeur de bande dont certains réseaux peuvent disposer. De plus, il faudrait, avant que l'on puisse prendre des décisions sur la meilleure manière de segmenter la totalité de la largeur de bande disponible, faire des hypothèses sur l'importance de la population des satellites dans chacune des gammes de caractéristiques. Ces décisions une fois prises, on serait dans l'impossibilité de modifier les segments pendant plusieurs dizaines d'années alors même que le spectre serait utilisé de manière inégale si les hypothèses susmentionnées venaient à se révéler incorrectes ou si les populations de satellites variaient notablement avec le temps; cela tendrait à dégrader l'amélioration d'efficacité attendue de la réduction de la non-homogénéité à l'intérieur des segments du spectre.

Il est impossible à l'heure actuelle d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'orbite/spectre par le service fixe par satellite en appliquant les mesures envisagées aux § 8.4.1, 8.4.2 et 8.4.3 ci-dessus. Néanmoins, ces concepts se révéleront peut-être applicables et utiles dans l'avenir pour améliorer l'homogénéité entre réseaux à satellite. Cette question est à étudier plus avant.

9. Réutilisation des fréquences par des satellites géosynchrones sur orbites inclinées

Théoriquement, il devrait être possible d'utiliser, sur les mêmes fréquences, deux ou trois satellites, ou même davantage, placés sur une trajectoire en forme de huit très allongé, centrée sur une longitude donnée [Rowe et Penzias, 1968]. Si l'on utilise une orbite elliptique synchrone inclinée au lieu d'une orbite circulaire inclinée, le satellite semble décrire une trajectoire en cercle déformé (en forme de poire) lorsqu'on l'observe de la Terre. Etant donné que cette trajectoire ne présente aucun point de croisement, la disposition des satellites sur la trajectoire peut s'en trouver facilitée.

On peut aussi concevoir que le nombre maximal de satellites puisse être augmenté en adoptant un système hybride combinant des satellites stationnaires et quasi stationnaires, soit sur orbite circulaire soit sur orbite elliptique [Shinji et Kurose, 1969].

En cas de trajectoire en forme de huit très allongé, les opérations de poursuite de l'antenne de la station terrienne peuvent être réduites, si les liaisons de communication sont commutées entre deux satellites aux points où ceux-ci sont les plus rapprochés l'un de l'autre [Wadsworth, 1980]. Selon une version, trois satellites sont uniformément espacés sur la trajectoire en huit, de façon que deux satellites virtuels à plein temps se trouvent l'un au nord et l'autre au sud de l'équateur, comme le montre la Fig. 8. Ces satellites virtuels se déplacent en suivant leur trajectoire, leurs lieux étant espacés de plusieurs degrés de latitude, selon les probabilités de brouillage mutuel. Par exemple, pour un espacement minimal de 3° entre les deux satellites actifs, il suffit d'une inclinaison de l'orbite de 2°. Le mouvement résultant de chaque satellite virtuel est limité à 1° en latitude et à 2 min d'arc en longitude, de sorte que la poursuite est réduite au minimum. Une autre version de la trajectoire en huit avec commutation, utilisant quatre satellites, a l'avantage d'assurer elle-même sa protection en cas de défaillance et de permettre d'éviter les interruptions de transit solaire. Cette version peut aussi être adaptée après coup à un intervalle de longitude occupé par un satellite géostationnaire. De plus, avec des satellites évoluant sur ces types d'orbite, la zone de service peut être étendue à des latitudes plus élevées que celles que permettent d'obtenir des satellites géostationnaires situés à la même longitude.

Toutes ces méthodes de réutilisation des fréquences rendent le prix de revient du segment spatial et du segment terrestre plus élevé que dans le cas d'un système à satellites purement géostationnaires. Il n'y a pas lieu de s'attendre à ce qu'elles soient mises en exploitation commerciale dans un proche avenir en raison de difficultés pratiques.

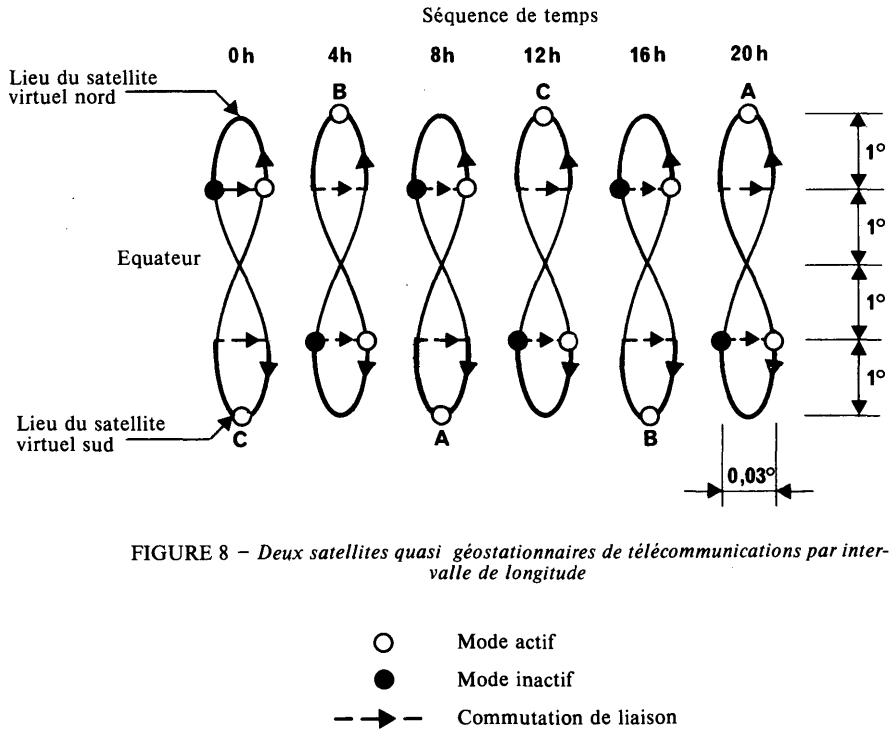


FIGURE 8 – *Deux satellites quasi géostationnaires de télécommunications par intervalle de longitude*

Mode actif

Mode inactif

Commutation de liaison

10. Autres facteurs influant sur le nombre et l'emplacement des satellites géostationnaires

10.1 *Considérations économiques, opérationnelles et techniques affectant la capacité d'un satellite*

Si l'on veut que l'orbite soit utilisée de façon très efficace, il faut que les systèmes à satellites fonctionnent selon le mode à limitation par le brouillage, mais cela aurait pour effet de réduire la capacité de chaque satellite et, partant, d'augmenter le nombre des satellites et des stations terriennes nécessaires pour constituer un réseau d'une capacité donnée. Ainsi, pour certaines raisons d'ordre économique et opérationnel, une prolifération des satellites dans un système donné n'est pas souhaitable. Comme les considérations d'ordre technique et économique militent en faveur de tendances inverses, il faudra sans doute trouver un compromis pour assurer à la fois la viabilité économique et une efficacité technique raisonnable de l'utilisation de l'orbite.

On a étudié cette question en supposant des valeurs différentes de l'indice de modulation dans les systèmes à multiplexage par répartition de fréquence à modulation de fréquence. Les résultats de cette étude indiquent par exemple qu'un système composé de trois satellites et occupant sur l'orbite un arc de 10° pourrait fournir au total 50 000 voies téléphoniques dans un seul sens avec un indice de modulation 0,5, alors que, pour avoir la même capacité de trafic, il faudrait un système de 10 satellites à indice de modulation de 2,5 occupant un arc de 7°. Aussi, dans les systèmes comprenant des stations terriennes en de nombreux emplacements, il serait, semble-t-il, plus économique d'utiliser un nombre restreint de satellites de plus grande puissance avec des indices de modulation moins élevés, au prix d'une efficacité un peu moindre de l'utilisation de l'orbite.

Cependant, cette question présente un aspect technique complexe, et une étude plus poussée pourra certainement contribuer à une meilleure compréhension du problème.

10.2 *Puissance surfacique à la surface de la Terre*

Augmenter la puissance surfacique totale à la surface de la Terre, soit en augmentant la puissance de quelques satellites soit en augmentant le nombre de satellites moins puissants, permet généralement une meilleure utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires. Toutefois, l'augmentation du nombre de satellites ou de la valeur limite de la densité surfacique de puissance maximale admissible à la surface de la Terre peut provoquer à la longue des brouillages excessifs dans les faisceaux hertziens à grande sensibilité. L'effet de la densité surfacique de puissance sur les faisceaux hertziens est étudié dans le Rapport 387.

Il est souhaitable de réduire tout éclairement inutile de la Terre par des satellites, comme cela se produit avec des antennes à couverture mondiale de type classique au voisinage de l'axe du faisceau. Pour éviter ce suréclairement, on peut appliquer une méthode de montage du faisceau. (Voir le Rapport 558.)

10.3 *Influence des courants de trafic*

L'emplacement des stations terriennes utilisant un satellite géostationnaire donné et le nombre des circuits que le réseau à satellite permet d'établir influent sur les caractéristiques fondamentales de l'utilisation de l'orbite, notamment l'emplacement du satellite sur l'orbite, la p.i.r.e. du satellite, l'ouverture du faisceau d'antenne du satellite et le type de modulation.

Le degré d'inefficacité dans l'utilisation de l'orbite dépend des caractéristiques imposées aux stations terriennes. Si ces stations sont très dispersées géographiquement, si elles ont besoin de grandes ouvertures de faisceau et d'une grande capacité en voies de transmission, il leur faudra une p.i.r.e. élevée et de faibles indices de modulation. Dans ce cas, le choix des emplacements orbitaux des satellites devra obéir à des règles rigoureuses, ce qui réduira la capacité totale de l'orbite.

10.4 *Caractéristiques géographiques*

Les caractéristiques géographiques influent sur l'arc de service utilisable d'une zone de service donnée et elles ont des interactions plus ou moins grandes avec les techniques appliquées pour la réutilisation des fréquences.

10.4.1 *Arcs de service*

L'arc de service d'une zone de service donnée dépend directement des caractéristiques géographiques (latitude, superficie et forme). Des restrictions supplémentaires peuvent être imposées par des exigences spéciales concernant l'angle de site minimum et la protection en cas d'éclipse:

– *Latitude:* Pour un seul récepteur et pour un angle de site minimum spécifié, la longueur de l'arc de service est uniquement fonction de la latitude. La Fig. 9 donne la longueur de l'arc de service pour un tel point, en fonction de la latitude et pour des angles de site de 0° à 40°. Pour une région étroite en latitude, c'est-à-dire une région dont tous les points sont approximativement à la même latitude, cette longueur est diminuée de la distance (mesurée en degrés de longitude) qui sépare les points le plus à l'est et le plus à l'ouest de la région.

– *Forme et superficie:* L'arc de service d'une zone étendue, de forme irrégulière, est déterminé par la latitude et la longitude des deux points de la zone où l'angle de site passe pour la première fois en dessous de la valeur minimale de fonctionnement, lorsque le satellite se déplace vers l'est ou l'ouest respectivement. En général, l'arc de service est d'autant plus petit que la zone de service est plus étendue et la latitude plus élevée. Une zone de service étroite et allongée a un arc de service plus petit qu'une zone de service à peu près circulaire de même étendue. Pour une zone de service proche de l'équateur, la dimension est-ouest tend à être la dimension déterminante; pour une zone de service plus proche de l'un des pôles, la dimension déterminante est la dimension est-ouest à la latitude la plus élevée.

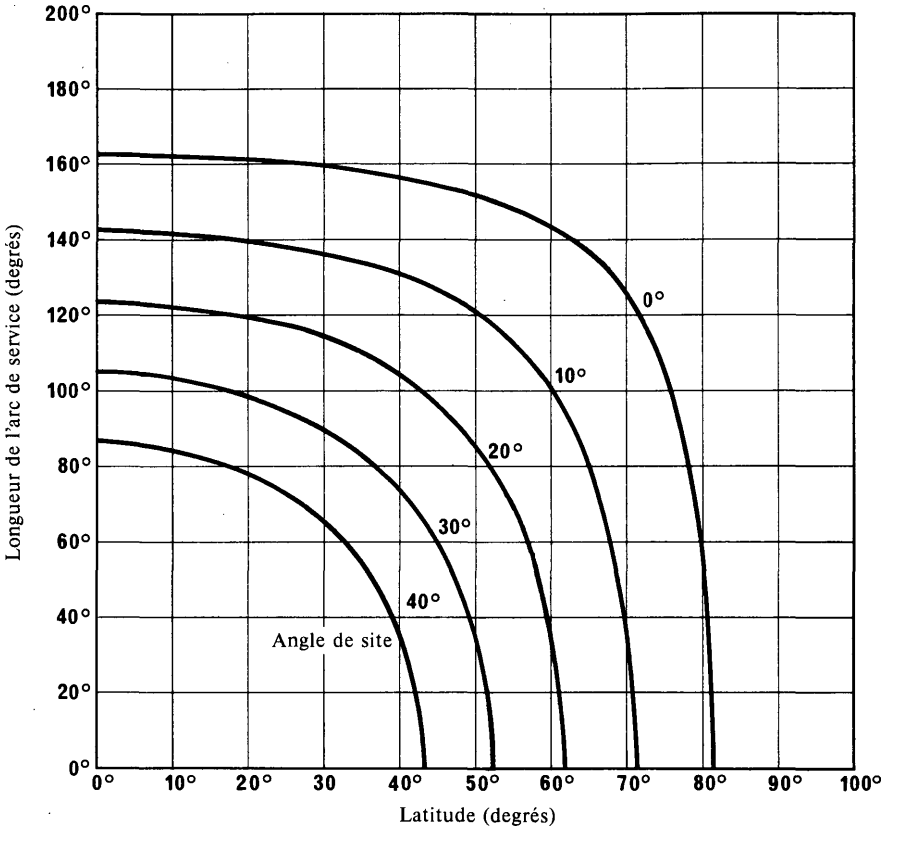


FIGURE 9 – *Arc de service d'un seul récepteur*

10.4.2 *Réutilisation des fréquences*

Il existe trois techniques qui permettent la réutilisation des fréquences: polarisation orthogonale, discrimination de l'antenne de la station terrienne et discrimination de l'antenne du satellite. Les caractéristiques géographiques ont une certaine influence sur ces trois techniques:

– *Polarisation orthogonale:* La discrimination que l'on peut obtenir entre deux faisceaux à polarisation croisée dépend du climat (qui détermine les statistiques pluviométriques) et de l'emplacement, c'est-à-dire la latitude et la longitude, de la station terrienne de réception. La dépolarisation due à la pluie est un phénomène important pour les polarisations rectiligne et circulaire. La variation de l'angle de polarisation à la réception, en fonction de la latitude et de la longitude, peut avoir une importance plus ou moins grande selon les effets produits par plusieurs facteurs; cette variation existe seulement en polarisation rectiligne. Ces deux effets sont étudiés en détail dans le Rapport 814.

– *Discrimination de l'antenne de la station terrienne:* Les caractéristiques géographiques ont peu d'effet sur la discrimination de l'antenne de la station terrienne. Cet effet s'explique par la différence entre l'angle géocentrique et l'angle topocentrique. Le rapport angle géocentrique/angle topocentrique varie entre 0,99 et 1,18 à la surface de la Terre.

– *Effet de discrimination due à l'antenne du satellite:* La discrimination que l'on peut obtenir avec des antennes de satellites ayant des faisceaux circulaires ou elliptiques, selon le diagramme de référence indiqué dans le Rapport 558, est caractérisée par un plateau de 20 dB pour les points distants du centre du faisceau de 1,3 à 3,15 ouvertures de faisceau, le gain au-delà de cette valeur diminuant à raison de 25 dB par octave jusqu'à un minimum de −10 dBi. Des gains de discrimination encore plus grands sont possibles si l'on emploie des faisceaux modelés. Des exemples de caractéristiques qu'il est possible d'obtenir avec la technologie des faisceaux modelés sont donnés dans le Rapport 558. L'emplacement relatif des différentes zones de service, qui détermine leur séparation et, par voie de conséquence, la discrimination que l'on peut attendre de l'antenne du satellite, est donc l'élément géographique prédominant pour l'utilisation de la ressource spectre/orbite.

10.4.3 *Exemples*

On trouvera ci-après des exemples typiques des effets qu'exercent les caractéristiques géographiques sur l'utilisation de l'orbite géostationnaire par le service fixe par satellite:

– la Région 2 est séparée des Régions 1 et 3 par de vastes étendues d'eau dont les frontières sont généralement orientées dans le sens nord-sud. Il en résulte un isolement relatif de la Région 2;

– les Régions 1 et 3 ont une portion substantielle de frontière commune orientée généralement dans le sens est-ouest, ce qui donne lieu à de fortes interactions entre leurs systèmes à satellites;

– l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud ont des interactions relativement faibles du fait de leur séparation géographique. Les satellites desservant ces deux continents peuvent avoir un faible espacement et même un emplacement commun dans certains cas. L'Amérique centrale et les Antilles exercent de fortes interactions aussi bien avec l'Amérique du Nord qu'avec l'Amérique du Sud;

– la Nouvelle-Zélande est suffisamment séparée d'autres zones de service pour que ses satellites aient un faible espacement avec ceux de ses voisins les plus proches;

– les nombreux pays d'Amérique centrale et des Antilles ont tous de très longs arcs de service parce qu'ils ont une faible superficie et qu'ils sont situés à de basses latitudes. Il est donc possible de placer leurs satellites sur des portions de l'arc qui ne peuvent ou ne doivent pas être utilisées par d'autres pays;

– les zones de service situées à des latitudes élevées comme le Canada, l'Alaska, la Scandinavie et les régions nord-est de l'U.R.S.S. ont toutes des arcs de service très courts.

10.5 *Bandes de fréquences supplémentaires*

L'attribution de nouvelles bandes de fréquences au service fixe par satellite par la CAMR-79 a grandement augmenté la capacité théorique de l'orbite des satellites géostationnaires. Presque toutes ces nouvelles bandes de fréquences sont au-dessus de 10 GHz. De nombreuses études devront être menées avant qu'on puisse déterminer comment l'application des méthodes d'utilisation rationnelle de l'orbite étudiées dans le présent Rapport sera affectée par l'emploi de ces bandes de fréquences élevées, mais on peut reconnaître dès maintenant les effets suivants:

– l'emploi d'antennes de satellite très directives sera facilité, ce qui augmentera considérablement la possibilité de réutiliser les fréquences;

– la propagation radioélectrique dans la troposphère sera bien moins bonne qu'aux fréquences inférieures actuellement utilisées. Il faudra donc élargir les marges de puissance sur les liaisons descendantes et, éventuellement, recourir à une réception en diversité d'espace dans les stations terriennes. Ces sujets sont examinés dans les Rapports 205 et 720;

– le fait que les largeurs de bande disponibles dans certaines de ces nouvelles bandes de fréquences sont plus grandes facilitera l'établissement de réseaux à satellites avec très grande capacité de transmission.

Il semble donc probable que les nouvelles bandes de fréquences, plus élevées, seront intéressantes pour les réseaux à satellites de très grande capacité, tandis que les bandes de fréquences inférieures seront préférables pour de nombreux systèmes. Il y a lieu d'étudier en priorité la propagation aux fréquences élevées considérées, notamment entre 10 et 30 GHz.

10.6 *Liaisons inter-satellites*

Le Rapport 451 porte sur les aspects généraux des liaisons inter-satellites. On considère ici ceux de ces aspects qui influencent l'efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences.

Une liaison directe offrirait les avantages suivants:

– le temps de transmission entre les stations terriennes terminales serait plus petit que dans un circuit mettant en œuvre une troisième station terrienne. Cet avantage pourrait être important en téléphonie;

– les problèmes examinés au § 10.3 seraient simplifiés;

- les arcs de l'orbite des satellites géostationnaires qui ne conviennent pas parfaitement pour des satellites servant à établir des réseaux dans des systèmes à couverture mondiale pourraient être utilisables à cet effet si des relais inter-satellites directs étaient disponibles;

- à un dernier stade théorique, dans lequel tous les besoins d'une station terrienne pourraient être satisfaits par un seul satellite (les connexions avec les autres stations terriennes étant assurées, si nécessaire, par des liaisons inter-satellites), l'utilisation du répéteur pourrait être améliorée et aussi, par voie de conséquence, celle de la largeur de bande, à mesure que les liaisons montantes et les liaisons descendantes desserviraient des groupes de plus en plus concentrés de stations terriennes.

En revanche, l'inconvénient suivant a été reconnu:

- dans les cas exigeant que des conditions plus rigoureuses soient imposées à la largeur de bande ou à la p.i.r.e. par voie sur le trajet montant et descendant, pour compenser le bruit introduit par une liaison inter-satellites, l'efficacité d'utilisation de l'orbite ou du spectre pourrait se trouver compromise.

10.7 *Souplesse dans le choix des emplacements des satellites*

Dans un petit nombre de cas, les spécifications relatives à la couverture à assurer par un satellite seront critiques à tel point qu'un petit changement de l'emplacement de ce satellite aura des conséquences importantes. En revanche, dans de nombreux cas, les caractéristiques du satellite et des stations terriennes associées seront telles qu'il n'y aura aucune difficulté ni inconvénient à modifier légèrement la position du satellite, à condition que ces modifications soient peu fréquentes. Le degré de souplesse dans le choix de l'emplacement pourrait se révéler utile pour réduire les brouillages entre les systèmes sur les arcs d'orbite encombrés, et il convient par conséquent que les ingénieurs chargés de la réalisation des systèmes en tiennent compte.

Il a été également démontré [CCIR, 1974-78k] que la longueur à donner à l'arc orbital nécessaire à un certain nombre de satellites qui desservent des zones de service distinctes dépend des positions relatives des différents satellites. On a admis par hypothèse dans cette étude que les zones de service étaient réparties au nord et au sud de l'équateur et s'étendaient sur quelque 8000 km de l'est à l'ouest, le chevauchement des zones de couverture correspondantes étant relativement petit. On a constaté que, pour des conditions de brouillage spécifiées, la disposition des satellites sur l'orbite influençait considérablement la longueur minimale acceptable de l'arc orbital occupé. Pour certaines dispositions des satellites, on pouvait se contenter d'un arc environ deux fois plus petit que pour d'autres dispositions. Il convient également de noter qu'il est impossible d'indiquer avec certitude les zones géographiques qui devront être couvertes, à telle ou telle époque future, par des satellites occupant un arc d'orbite donné; on ne pourrait donc optimiser l'utilisation de l'orbite, en jouant sur la disposition des satellites, que si les réseaux étaient conçus de telle manière que l'on puisse, si besoin est, repositionner les satellites, après leur mise en service, dans les limites d'un certain arc de service.

Afin de créer les conditions d'une utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires et de permettre aux futures stations spatiales d'occuper des positions orbitales appropriées, la CAMR-79 a décidé que les renseignements à notifier concernant l'orbite doivent comprendre l'«arc de service» et l'«arc visible» et aussi que l'«arc de service» doit englober l'«arc visible» pour un angle de site minimal donné à partir des stations terriennes ou zones de service associées à la station spatiale (Appendices 3 et 4 au Règlement des radiocommunications). La détermination géométrique de l'«arc de service» dépend de la séparation géographique entre les zones de service ou entre les stations terriennes, et de l'angle de site minimal acceptable pour des conditions de fonctionnement données, angle qui ne doit en aucun cas être inférieur à l'angle de site minimal des antennes de station terrienne nécessaire pour empêcher que des brouillages ne soient causés aux stations de Terre (Article 11 du Règlement des radiocommunications). Il y a donc une relation inverse entre les dimensions de la zone de service ou la séparation entre les stations terriennes, d'une part, et l'«arc visible» et l'«arc de service» de l'orbite des satellites géostationnaires, d'autre part. Par conséquent, toute diminution de la zone de service se traduit en général par une plus grande souplesse en ce qui concerne le positionnement de satellites. Par ailleurs, l'«arc de service» est directement proportionnel à la «zone de couverture la plus défavorisée» qu'il faut prendre en considération dans les études sur la probabilité de brouillage. On trouvera dans [Dolezel, 1977] une méthode permettant de déterminer les éléments géométriques en question.

Il faut bien comprendre cependant que cette forme de réalisation, visant à obtenir la souplesse maximale dans le choix des positions orbitales, pourrait abaisser les performances et accroître le prix du satellite, surtout du fait qu'il pourrait être souvent nécessaire de prévoir des moyens de commande pour réorienter les faisceaux d'antenne afin de conserver la couverture requise. Cela pourrait entraîner une diminution de rentabilité du système.

Outre les spécifications relatives à la couverture, les problèmes les plus importants sont les suivants:

- Difficultés techniques dans la station terrienne. Il faudrait disposer d'une certaine marge d'orientation de l'antenne. Les variations de l'angle de site de l'antenne pourraient avoir des conséquences sur le rapport G/T par temps clair et aussi sur l'importance des dégradations dues à la propagation. Des modifications de l'angle de pointage de l'antenne pourraient exiger une répétition de la coordination des fréquences avec des services de radiocommunication de Terre.

Il se peut que les possibilités d'orientation des futurs systèmes, notamment ceux dont les antennes de station terrienne seront petites, soient limitées ou même nulles, à tel point qu'une légère modification de la position du satellite pourrait poser des problèmes tant mécaniques qu'opérationnels et entraîner des interruptions du service. Dans le cas d'un système comportant un grand nombre de stations terriennes télésurveillées, l'envoi de techniciens à chaque emplacement de station pour modifier l'orientation de l'antenne occasionnerait des frais appréciables.

- Antenne du satellite. D'une manière générale, pour une zone géographique donnée, la couverture que peut assurer l'antenne d'un satellite est optimale lorsque le satellite est situé sur un segment d'arc précis de l'orbite des satellites géostationnaires. Si le satellite était destiné à fonctionner en dehors de ce segment, l'ouverture du lobe principal devrait être quelque peu plus large, ce qui entraînerait une réduction du gain de l'antenne. Il peut aussi être nécessaire de modifier la direction des faisceaux étroits par rapport à la direction de la projection du satellite sur la surface de la Terre.
- Eclipse solaire. Pour les satellites ne disposant pas d'une capacité d'alimentation suffisante par batteries pour assurer l'intégralité du service pendant les éclipses, on risquerait d'être limité à des positions orbitales pour lesquelles l'éclipse devrait avoir lieu en dehors des heures de grand trafic.
- Besoins de propergol pour la commande sur orbite. La masse de propergol nécessaire pour transférer un satellite d'un emplacement orbital à un autre peut être très importante, en particulier si ce transfert doit être effectué rapidement. Voir le Rapport 556.
- Problèmes d'exploitation. S'il se révèle nécessaire de déplacer un satellite opérationnel, le service risque d'être interrompu si les stations terriennes ne disposent pas de moyens de poursuite automatique. Ce problème serait particulièrement aigu dans des réseaux comprenant un grand nombre de stations terriennes non surveillées. Si un satellite opérationnel doit être déplacé sur un arc d'orbite occupé par un autre satellite opérationnel qui utilise la même bande de fréquences, il y a des risques de brouillage si l'un ou l'autre de ces satellites n'est pas mis hors service.

La souplesse de positionnement de satellites desservant des zones très étendues en longitude serait faible. En effet, l'arc de visibilité mutuel de ces satellites serait petit. D'autre part, les difficultés énumérées ci-dessus seraient de nature à restreindre considérablement la souplesse de positionnement dans d'autres cas. Néanmoins, les réalisateurs des systèmes ont à leur disposition un certain nombre de procédés qui pourraient accroître notablement les possibilités de déplacement orbital des satellites; à cet égard, il conviendrait de prendre les dispositions suivantes, dans la mesure du possible:

- Il faudra faire en sorte que les antennes des stations terriennes puissent être pointées sur n'importe quel point de l'arc orbital de visibilité, pour le réseau auquel la station terrienne est destinée.
- Les marges de p.i.r.e., aussi bien sur la liaison montante que sur la liaison descendante, devront être suffisantes, quelles que soient les variations d'angle de site dans les stations terriennes.
- Les batteries des satellites devront avoir une capacité suffisante pour assurer les services pendant les périodes d'éclipse.
- Les diagrammes de couverture par les faisceaux ponctuels devront être tels que l'on puisse tolérer des changements de position orbitale, dans la mesure où les brouillages l'autoriseront.
- Dans le cas d'un satellite rayonnant plusieurs faisceaux ponctuels, il pourrait y avoir intérêt à faire en sorte que les orientations relatives de ces faisceaux puissent être réglées en orbite.
- Nécessité de disposer de satellites de réserve en orbite.
- Nécessité de disposer d'une réserve de carburant de propulsion pour modifier la position d'un satellite.
- La coordination des fréquences devra tenir compte des futurs transferts orbitaux éventuels des satellites.

On a reconnu que la modification en orbite des caractéristiques des antennes de satellite pourrait susciter des difficultés insurmontables; s'il en est ainsi, il serait bon que la conception des engins spatiaux se fasse de telle sorte que les caractéristiques définitives des antennes puissent être spécifiées à un stade de la construction aussi tardif que possible.

10.8 *Influence des conditions de propagation*

On a noté que la mise en œuvre d'antennes de station terrienne fonctionnant en diversité d'emplacement, pour la réception des signaux de satellite, est une technique susceptible d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires dans certaines conditions, notamment aux fréquences supérieures à 10 GHz. En certains emplacements géographiques, les conditions climatiques locales sont telles que les signaux émis sur des fréquences supérieures à 10 GHz sont très affaiblis, pendant de petits pourcentages de temps, par les nuages et la pluie. En un tel emplacement, une station terrienne qui reçoit un signal de satellite sans diversité d'emplacement ne peut avoir la qualité de fonctionnement spécifiée par l'Avis 353 que si le signal est émis avec une p.i.r.e. supérieure à celle qui est nécessaire pour fournir les performances correspondantes pendant un grand pourcentage de temps. On a noté que l'emploi, dans les stations terriennes, d'antennes fonctionnant en diversité d'emplacement peut permettre de supprimer la marge supplémentaire de p.i.r.e. contre les évanouissements; cela étant, moyennant une nouvelle optimisation des paramètres de modulation, on peut se servir de la p.i.r.e. supplémentaire – qui,

autrement, aurait été nécessaire comme marge contre les évanouissements – pour accroître la capacité en voies du système. Exemple: soit une diversité d'emplacement telle que la marge supplémentaire contre les évanouissements se trouve réduite de 4 dB, pour un signal MRF; la «réoptimisation» des paramètres de modulation permettrait d'augmenter de 36% la capacité en voies des porteuses. Dans les systèmes numériques, une réduction correspondante de la marge d'évanouissement requise pourrait imposer l'utilisation d'un système de correction d'erreurs vers l'avant, de manière à disposer d'une capacité supplémentaire pour le trafic. Cette augmentation de capacité représenterait une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires.

Dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz, la puissance du bruit de brouillage sur une liaison montante – bruit introduit par d'autres stations terriennes – augmente généralement pendant les précipitations locales à la station terrienne qui émet la porteuse utile. En conséquence, on pourrait être amené à spécifier pour l'espacement entre satellites – déterminé d'après la tolérance de bruit pour un petit pourcentage de temps – une valeur supérieure à la valeur acceptable par temps clair. Les procédés suivants peuvent être utiles pour réduire à un minimum l'augmentation de l'espacement des satellites:

- utilisation de la diversité d'emplacement;
- utilisation d'une régulation «adaptée» de la puissance d'émission des stations terriennes;
- réalisation de l'antenne du satellite de manière qu'elle ait un gain plus élevé dans la direction correspondant à des précipitations généralement plus fortes qu'ailleurs.

10.9 *Croisement des faisceaux dans les systèmes à satellites*

Si les satellites qui desservent des zones géographiques limitées et qui utilisent des bandes de fréquences communes sont situés approximativement à la même longitude que leurs zones de service, les satellites adjacents sur l'orbite auront tendance à desservir les zones adjacentes. Ainsi, la réduction des brouillages entre les deux réseaux qui pourrait être assurée par les antennes à faisceau étroit des satellites peut être excessivement faible. Cependant, s'il est possible de placer les satellites de telle manière que les satellites adjacents puissent desservir des zones géographiques distinctes, et si, de ce fait, les zones géographiques adjacentes sont desservies par des satellites convenablement espacés sur l'orbite, les caractéristiques directionnelles des antennes des satellites peuvent offrir une plus grande protection, notamment si ces antennes bénéficient des techniques de réduction des rayonnements dans les lobes latéraux.

On a proposé l'utilisation éventuelle de faisceaux ponctuels croisés dans les systèmes à satellites, pour améliorer l'utilisation de la largeur de bande et de l'arc d'orbite. Ce procédé permet de réduire notablement la puissance du bruit de brouillage et de réduire également l'espacement orbital des satellites. Dans les cas favorables, on pourrait réduire l'espacement orbital minimal d'un pourcentage atteignant environ 30% par rapport à l'utilisation de faisceaux non croisés; toutefois, il faudra faire une étude particulière dans chaque cas d'espèce.

10.10 *Autres facteurs techniques*

Les facteurs ci-après n'ont pas été étudiés en détail, mais ils ne doivent pas être ignorés et peuvent avoir une importance considérable dans certains cas particuliers:

- variation accidentelle du pointage de l'antenne d'une station terrienne;
- influence de la réfraction dans l'atmosphère, notamment pour les stations terriennes fonctionnant avec de petits angles de site;
- rayonnement en provenance de satellites non utilisés (y compris les satellites de réserve);
- contraintes imposées aux emplacements des satellites par les précipitations dans l'atmosphère aux petits angles de site.

11. Critères d'efficacité dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences

Certaines portions de l'orbite des satellites géostationnaires étant de plus en plus encombrées, il convient à présent d'étudier des systèmes à satellites en fonction de leur utilisation des ressources limitées de la largeur de bande dans le spectre des fréquences et de l'arc orbital dans l'orbite des satellites géostationnaires. Ces deux ressources doivent être employées efficacement, mais la question de savoir ce qui constitue, en fait, une utilisation efficace de ces ressources constitue un problème complexe. Dans ce contexte, l'«efficacité» ne possède pas la signification purement mathématique dans laquelle une capacité optimale ou théoriquement maximale de l'orbite est exprimée en pourcentage de l'efficacité d'un système quelconque. Il s'agit en fait de l'«utilisation effective», qui suppose que cette orbite constitue une entité de proportions limitées, même si nous ne pouvons pas mesurer ou exprimer sa capacité par un simple chiffre fixé une fois pour toutes. Le souci d'atteindre l'efficacité d'utilisation de l'orbite signifie que nous l'utilisons de la façon la plus économique. Ce sujet est traité plus avant dans le Rapport 711.

12. Introduction, étalée dans le temps, de mesures propres à améliorer l'économie de l'utilisation de l'orbite

Pour répondre à l'accroissement des besoins en matière de trafic des systèmes à satellites utilisant l'orbite géostationnaire, il importe que l'on mette en œuvre des techniques propres à améliorer l'économie d'utilisation de cette orbite aussitôt que leur réalisation est techniquement possible et que leur emploi est compatible avec le bon

fonctionnement des systèmes. Il faut cependant reconnaître que cette mise en œuvre n'ira pas toujours de pair avec l'objectif de prix de revient minimum de la réalisation des systèmes. Parmi les techniques dont il s'agit, on peut citer les suivantes:

- réduction des lobes latéraux des antennes de station terrienne;
- réduction de la p.i.r.e. hors axe des stations terriennes;
- techniques entraînant une réduction de l'espacement nécessaire sur l'orbite entre systèmes écoulant du trafic SCPC et systèmes écoulant du trafic de télévision analogique; parmi ces techniques, on peut signaler des méthodes améliorées de dispersion de l'énergie, ainsi que la souplesse dans le choix des fréquences des voies SCPC parmi celles pour lesquelles le niveau des brouillages est acceptable;
- souplesse pour ce qui est de la position sur l'orbite après lancement, cela afin de permettre la réalisation de nouveaux réseaux;
- amélioration des caractéristiques des antennes des engins spatiaux;
- réduction de l'importance des émissions rayonnées par les satellites en dehors de la zone de couverture prévue;
- limitation des faisceaux globaux à une fraction donnée de la largeur de bande attribuée;
- augmentation des niveaux maximaux du brouillage dû à une source unique ainsi que du brouillage total grâce à une réalisation des systèmes telle que les brouillages entre réseaux représentant une fraction plus importante de leur niveau de bruit total;
- utilisation de la transmission numérique des signaux vidéo.

Il est urgent d'étudier quels seraient, pour chacune de ces techniques, ses possibilités techniques de réalisation, son coût, ses conséquences sur l'exploitation, et enfin l'amélioration de l'utilisation de l'orbite à laquelle elle donnerait lieu. L'introduction de ces techniques devrait se faire avec méthode, au moyen d'Avis et compte tenu des facteurs dont il a été question plus haut. Chacune d'elles devrait être introduite dès le moment où elle devient nécessaire afin de garantir que la capacité de l'orbite soit suffisante pour répondre aux besoins en matière de trafic des systèmes qui l'utilisent. Il pourra se faire que cette introduction doive intervenir plus rapidement dans certaines bandes de fréquences et sur certaines portions de l'orbite des satellites géostationnaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOLEZEL, I. [janvier 1977] Relation entre un arc de l'orbite des satellites géostationnaires et son angle de site minimal à partir d'une région de la surface terrestre. *J. des Télécomm.*, Vol. 44, **1**, 21-25.

FUENZALIDA, J. C. [novembre 1969] A comparative study of the utilization capacity of the geostationary orbit. INTELSAT/IEE Conference on Digital Satellite Communications, Londres, Royaume-Uni.

ITO, Y., MIZUNO, T. et MURATANI, T. [octobre 1979] Effective utilization of geostationary orbit through optimization. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, **10**, Partie I, 1551-1558.

JOWETT, J. K. S. et JEFFERIS, A. K. [août 1969] Ultimate communications capacity of the geostationary satellite orbit. *Proc. IEE*, Vol. 116, **8**, 1304-1310.

ROWE, H. E. et PENZIAS, A. A. [décembre 1968] Efficient spacing of synchronous communication-satellites. *BSTJ*, Vol. 47, **10**, 2379-2433.

SHINJI, M. et KUROSE, Y. [septembre 1969] Orbit allocation of domestic communications satellite. *Proc. IEEE* (Lett.), Vol. 57, **9**, 1655-1656.

WADSWORTH, D. V. Z. [1980] Longitude re-use plan, double communication satellite capacity of geostationary arc. Proc. AIAA 8th Communications Satellite Systems Conference, Orlando, Floride, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1969]: IV/334, réunion de 1969.

[1970-74]: **a.** 4/1 (Groupe de travail intérimaire 4/1); **b.** 4/252 et 4/299 (Groupe de travail intérimaire 4/1); **c.** 4/80 (Italie); **d.** 4/76 (Etats-Unis d'Amérique); **e.** 4/58 (Etats-Unis d'Amérique); **f.** 4/224 (Etats-Unis d'Amérique); **g.** 4/245 (Canada); **h.** 4/55 (Etats-Unis d'Amérique); **i.** 4/231 (Etats-Unis d'Amérique); **j.** 4/233 (Etats-Unis d'Amérique).

[1974-78]: **a.** 4/1 (Groupe de travail intérimaire 4/1); **b.** 4/222 (Groupe de travail intérimaire 4/1); **c.** 4/231 (Japon); **d.** 4/36 (Japon); **e.** 4/321 (Allemagne (République fédérale d')); **f.** 4/322 (Allemagne (République fédérale d')); **g.** 4/90 (Canada); **h.** 4/47 (Etats-Unis d'Amérique); **i.** 10/246-11/297 (Projet de Rapport AE/10-11 adopté par la réunion intérimaire des C.E. 10 et 11 en 1976); **j.** 4/284 (Royaume-Uni); **k.** 4/236 (Japon).

[1978-82]: **a.** 4/72 (Etats-Unis d'Amérique); **b.** 4/149 (Italie); **c.** 4/39 (Japon); **d.** 4/73 (Etats-Unis d'Amérique); **e.** 4/38 (Japon); **f.** 4/81(Rév. 1) (Canada); **g.** 4/83 et Add. 1 (Canada); **h.** 4/74 (Etats-Unis d'Amérique).

BIBLIOGRAPHIE

ROSENBAUM, A. S. [février 1969] PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*, Vol. 48, **2**, 413-442.

ANNEXE I

MÉTHODE DE PRÉSENTATION DES CALCULS DE BROUILLAGE POUR DEUX SYSTÈMES A SATELLITES ADJACENTS

Cette méthode repose sur la définition de deux paramètres d'hétérogénéité entre les deux satellites adjacents et d'un paramètre de compatibilité entre les deux systèmes à satellites (y compris les stations terriennes respectives). On suppose que les satellites desservent une même zone géographique et qu'ils utilisent les mêmes bandes de fréquences sur les liaisons montante et descendante. Ces restrictions pourront être supprimées ultérieurement.

On considère d'abord le cas où le système à satellites B cause un brouillage au système à satellites A. On définit ainsi l'hétérogénéité de réception U_{BA} et l'hétérogénéité d'émission V_{BA} du satellite B par rapport au satellite A:

$$U_{BA} = P_B - P_A \tag{1}$$

$$V_{BA} = E_B - E_A \tag{2}$$

où:

P_A et P_B sont les puissances surfaciques (en dB) nécessaires pour la réception par le satellite figurant en indice et E_A et E_B les valeurs de la p.i.r.e. (en dB) des satellites. On notera qu'étant donné les hypothèses ci-dessus, les valeurs utiles d'un système sont simultanément les valeurs brouilleuses de l'autre système.

On définit ainsi le facteur de compatibilité K_{BA} (en dB) du système B par rapport au système A:

$$K_{BA} = -10 \log \left\{ 10^{0,1\,[U_{BA} - \Delta G_B (f_{up})]} + 10^{0,1\,[V_{BA} - \Delta G_A (f_{down})]} \right\} \tag{3}$$

Dans cette formule,

ΔG_A et ΔG_B : les différences entre le gain maximum et le gain en dehors de l'axe à $\varphi = 1°$, calculées à partir du diagramme de rayonnement de référence (y compris la correction pour D/λ pour les petites antennes) du Rapport 391, pour les stations terriennes du système désigné par l'indice (on notera que pour les petites antennes, le gain en dehors de l'axe ainsi calculé n'est que théorique);

f_{up}, f_{down} : les fréquences sur les liaisons montante et descendante.

On peut alors établir que:

$$25 \log \theta_{BA} = \left(\frac{C}{N}\right)_A - 10 \log \left(\frac{q}{1-q}\right) - K_{BA} \tag{4}$$

Dans cette formule,

$\left(\frac{C}{N}\right)_A$: le rapport porteuse/bruit nominal (en dB) à l'entrée du récepteur de la station terrienne du système A;

q : le rapport de brouillage autorisé pour une seule source de brouillage (par exemple, $q = 0{,}04$ pour le critère de 4%), et

θ_{BA} : l'écart angulaire (considéré de la station terrienne) entre les satellites, pour lequel le critère d'une seule source de brouillage est exactement satisfait pour le brouillage causé par le système B au système A (compte tenu à la fois du brouillage sur la liaison montante et du brouillage sur la liaison descendante).

K_{BA} est appelé facteur de compatibilité, étant donné qu'une augmentation de K_{BA} réduit la distance angulaire (B est moins gênant pour A).

Il est intéressant de tracer des courbes de K_{BA} constant en utilisant U_{BA} et V_{BA} comme axes de coordonnées. La Fig. 10 donne un exemple dans lequel le contour de $K_{BA} = +11{,}3$ dB, pour des diamètres d'antenne $D_A = 5$ m et $D_B = 1$ m, $f_{up} = 14$ GHz et $f_{down} = 12{,}5$ GHz, est représenté dans le quadrant gauche inférieur. Dans la zone hachurée, $K_{BA} > 11{,}3$ dB. On a choisi K_{BA} de manière qu'il corresponde à $\theta_{BA} = 5°$, dans un système où $(C/N)_A = 15$ dB et $q = 0{,}04$, comme cela peut se vérifier à partir de la formule (4). Il est donc clair, si les satellites sont espacés de 5°, que dans le système A, le critère de brouillage par une seule source est satisfait partout dans la zone hachurée dans le plan U_{BA}, V_{BA}.

Le brouillage causé au système B par le système A peut être traité de la même manière; seuls les indices sont échangés. On notera que $U_{AB} = U_{BA}$, $V_{AB} = V_{BA}$. Pour cette raison, la courbe de K_{AB} peut être tracée sur la même figure, comme indiqué au coin droit supérieur de la Fig. 10. Si $(C/N)_B = 15$ dB et $q = 0{,}04$, de nouveau $K_{AB} = 11{,}3$ dB correspond à un écart angulaire de 5° et avec cet écart, le critère de brouillage par une seule source est satisfait pour le système B à l'intérieur de la courbe. On voit qu'en pareil cas, aucune valeur de U et V ne satisfait simultanément au critère de brouillage par une seule source pour les deux systèmes, pour un écart de 5° entre les satellites.

La Fig. 11 montre le même cas que précédemment, si ce n'est que l'on a également tracé des courbes pour D_B = 2 m et D_B = 3 m. Les limites admissibles pour les hétérogénéités entre les satellites apparaissent immédiatement sur la figure, pour chaque valeur choisie pour D_B.

L'hypothèse limitative selon laquelle les satellites desservent une même zone géographique et occupent exactement les mêmes bandes de fréquences peut être éliminée en introduisant un facteur de correction supplémentaire dans U_{BA} et V_{BA}. On peut inclure dans ces facteurs de correction l'effet des diagrammes des antennes des satellites et des bandes de fréquences qui ne se chevauchent que partiellement.

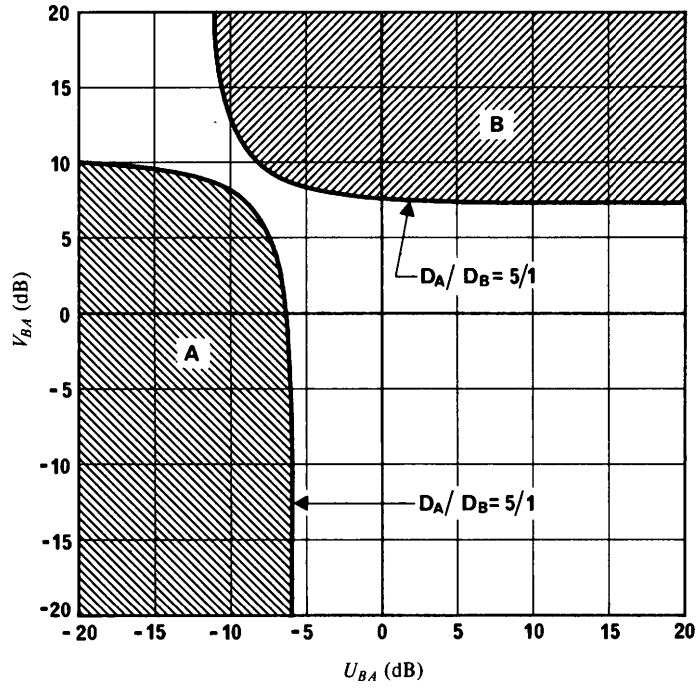


FIGURE 10 – *Principe des courbes de brouillage pour une seule source de brouillage*

A: critère pour une seule source de brouillage satisfait pour le système A
B: critère pour une seule source de brouillage satisfait pour le système B

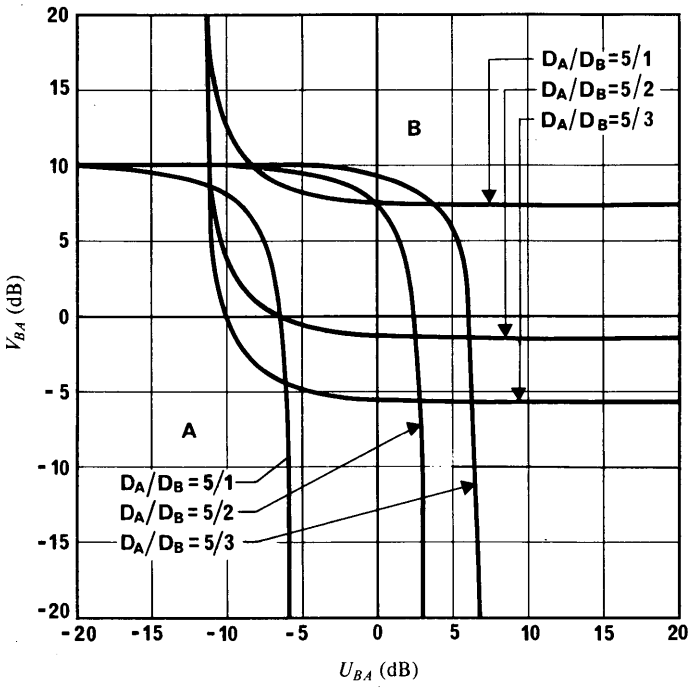


FIGURE 11 – *Exemple d'étude d'une seule source de brouillage. Ecart angulaire entre satellites 5°, C/N = 15 dB (les deux systèmes), q = 0,04*

A: critère pour une seule source de brouillage satisfait pour le système A
B : critère pour une seule source de brouillage satisfait pour le système B

RAPPORT 454-3

MÉTHODE DE CALCUL POUR DÉTERMINER S'IL Y A LIEU DE PROCÉDER A LA COORDINATION ENTRE DES RÉSEAUX A SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES PARTAGEANT LES MÊMES BANDES DE FRÉQUENCES

(Programme d'études 2J/4)

(1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

L'utilisation accrue de l'orbite des satellites géostationnaires par des satellites et les stations terriennes correspondantes peut augmenter les probabilités de brouillage entre les réseaux si ceux-ci utilisent les mêmes bandes de fréquences. Le nombre de paramètres caractérisant un système est si étendu qu'il est utile d'élaborer une méthode simple permettant de déterminer s'il y a un risque de brouillage entre deux réseaux à satellite donnés. La méthode décrite dans ce Rapport est conforme à celle que donne l'Appendice 29 au Règlement des radiocommunications et elle s'applique chaque fois que deux réseaux utilisent en partage une partie commune de la bande de fréquences assignée, sur l'un au moins de leurs trajets. Elle est fondée sur le principe selon lequel la température de bruit du système brouillé subit une augmentation apparente sous l'effet des brouillages qu'il subit, les signaux brouilleurs étant traités comme un bruit thermique dont la densité spectrale de puissance serait égale à la densité spectrale maximale de puissance de ces signaux. Cette méthode est donc applicable quelles que soient les caractéristiques de modulation des réseaux à satellite en jeu et quelles que soient les fréquences exactes qu'ils utilisent.

Selon cette méthode, on calcule pour une liaison par satellite donnée l'accroissement apparent de la température de bruit équivalente (la température de bruit équivalente d'une liaison est définie au numéro 168 du Règlement des radiocommunications) résultant du brouillage causé par un système donné (voir le § 2 ci-dessous) et le rapport de cet accroissement à la température de bruit équivalente de la liaison par satellite, exprimé en pourcentage, est comparé à une valeur seuil (voir les § 2.3 et 3 ci-dessous).

2. Méthode à appliquer pour le calcul de l'accroissement apparent de la température de bruit équivalente de la liaison par satellite sous l'effet du brouillage

2.1 Les satellites de radiocommunication nécessitent des assignations dans deux bandes de fréquences, une pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante. Habituellement, ces bandes de fréquences sont associées par paires, une bande pour les liaisons montantes et l'autre pour les liaisons descendantes. Le cas I ci-dessous décrit les possibilités de brouillage entre deux systèmes qui ont de telles assignations. Cependant, il devrait être possible pour certains systèmes d'utiliser des bandes de fréquences interverties (usage bidirectionnel) par rapport au cas I; la bande de la liaison montante d'un réseau est alors la même que celle de la liaison descendante d'un réseau utilisant un satellite adjacent; ceci est le cas II. Ces deux cas couvrent toutes les positions relatives du satellite, de celles qui sont étroitement espacées à celles qui sont quasi antipodales.

Soit A une liaison par satellite du réseau R associé au satellite S et A′ une liaison par satellite du réseau R′ associé au satellite S′. Les symboles tels que a, b, c se rapportent à la liaison par satellite A et les symboles tels que a′, b′, c′ à la liaison par satellite A′.

Les notations utilisées pour la liaison par satellite A sont les suivantes:

T: température de bruit équivalente de la liaison par satellite, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne (K);

T_s: température de bruit du système de réception de la station spatiale, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de la station spatiale (K);

T_e: température de bruit du système de réception de la station terrienne, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne (K);

ΔT_s: accroissement apparent de la température de bruit du système de réception du satellite S, causé par une émission brouilleuse, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de ce satellite (K);

ΔT_e: accroissement apparent de la température de bruit du système de réception de la station terrienne e_R, causé par une émission brouilleuse, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de cette station (K);

p_s: densité maximale de puissance par Hz fournie à l'antenne du satellite S (moyenne prise dans la bande de 4 kHz la plus défavorisée lorsque la fréquence de la porteuse est inférieure à 15 GHz, ou prise dans la bande de 1 MHz la plus défavorisée lorsque la fréquence de la porteuse est supérieure à 15 GHz) (en W/Hz);

$g_3(\eta)$: gain de l'antenne d'émission du satellite S dans la direction η (rapport numérique de puissances);

- η_A: direction, à partir du satellite S, de la station terrienne de réception e_R pour la liaison par satellite A;
- $\eta_{e'}$: direction à partir du satellite S, de la station terrienne de réception e'_R pour la liaison par satellite A′;

  Note. – Le produit de $p_s g_3(\eta_{e'})$ est la p.i.r.e. maximale par Hz du satellite S dans la direction de la station terrienne de réception e'_R pour la liaison par satellite A′;
- $\eta_{s'}$: direction, à partir du satellite S, du satellite S′;

p_e: densité maximale de puissance par Hz fournie à l'antenne de la station terrienne d'émission e_T (moyenne prise dans la bande de 4 kHz la plus défavorisée lorsque la fréquence de la porteuse est inférieure à 15 GHz, ou prise dans la bande de 1 MHz la plus défavorisée lorsque la fréquence de la porteuse est supérieure à 15 GHz) (en W/Hz);

$g_2(\delta)$: gain de l'antenne de réception du satellite S, dans la direction δ (rapport numérique de puissances);

- δ_A: direction, à partir du satellite S, de la station terrienne d'émission e_T, pour la liaison par satellite A;
- $\delta_{e'}$: direction, à partir du satellite S, de la station terrienne d'émission e'_T, pour la liaison par satellite A′;
- $\delta_{s'}$: direction, à partir du satellite S, du satellite S′;

$g_1(\theta)$: gain de l'antenne d'émission de la station terrienne e_T dans la direction du satellite S′ (rapport numérique de puissances);

$g_4(\theta)$: gain de l'antenne de réception de la station terrienne e_R dans la direction du satellite S′ (rapport numérique de puissances);

θ: espacement topocentrique angulaire entre les deux satellites, compte tenu des tolérances de maintien en position longitudinale;

Note. – Seul l'angle topocentrique θ doit être utilisé dans le cas I.

θ_g : espacement géocentrique angulaire, en degrés, entre les deux satellites, compte tenu des tolérances de maintien en position longitudinale;
Note. – Seul l'angle géocentrique θ_g doit être utilisé dans le cas II.

k : constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K);

l_d : affaiblissement de transmission en espace libre sur la liaison descendante (rapport numérique de puissances); évalué depuis le satellite S jusqu'à la station terrienne de réception e_R pour la liaison par satellite A;

l_u : affaiblissement de transmission en espace libre sur la liaison montante (rapport numérique de puissances); évalué depuis la station terrienne e_T jusqu'au satellite S pour la liaison par satellite A;

l_s : affaiblissement de transmission en espace libre sur la liaison inter-satellites (rapport numérique de puissances); évalué depuis le satellite S' jusqu'au satellite S;

γ : gain de transmission d'une liaison par satellite spécifique subissant des brouillages, évalué depuis la sortie de l'antenne de réception de la station spatiale S jusqu'à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne e_R (rapport numérique de puissances, habituellement inférieur à 1).

Le nouveau Rapport 871 décrit plusieurs méthodes pour calculer les valeurs de γ et de T dans un réseau.

Pour simplifier les calculs, il faut admettre par hypothèse que les affaiblissements de transmission de référence sur les trajets espace vers Terre sont identiques, quels que soient le satellite et la station terrienne considérés. De même, les affaiblissements de transmission de référence sur les trajets Terre vers espace sont supposés être identiques. Pour chacun de ces deux types de trajet, les affaiblissements sont calculés pour la distance espace vers Terre ou Terre vers espace du réseau R' et pour la fréquence centrale de la bande commune aux deux réseaux. Ces hypothèses sont raisonnables dans le cas de l'orbite des satellites géostationnaires car, en espace libre, la différence d'affaiblissement entre le plus court trajet et le plus long trajet est seulement de 1,5 dB environ.

Cas I – *Réseaux à satellites utile et brouilleur partageant la même bande de fréquences dans le même sens de transmission*

ΔT_s et ΔT_e peuvent être calculés d'après les expressions suivantes:

$$\Delta T_s = \frac{p'_e\, g'_1(\theta)\, g_2(\delta_{e'})}{k l_u} \tag{1}$$

$$\Delta T_e = \frac{p'_s\, g'_3(\eta_e)\, g_4(\theta)}{k l_d} \tag{2}$$

Dans les formules qui précèdent, les gains $g'_1(\theta)$ et $g_4(\theta)$ sont ceux des stations terriennes considérées. Dans le cas où l'on ne dispose pas de données numériques précises concernant les antennes des stations terriennes, on doit se servir du diagramme de rayonnement de référence donné dans l'Avis 465 et le Rapport 391.

On utilise le symbole ΔT pour représenter l'accroissement de la température de bruit équivalente pour la liaison par satellite toute entière rapporté à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne de réception e_R, dû aux brouillages causés par le réseau R'.

Cet accroissement de la température de bruit résulte des brouillages qui affectent à la fois le récepteur du satellite de la liaison A et celui de la station terrienne de cette liaison. Dans le cas où les satellites S et S' sont équipés de simples répéteurs-changeurs de fréquence ayant la même fréquence de transposition, les brouillages subis par la liaison A sont causés sur les liaisons montante et descendante par la même liaison A'.

On peut donc écrire:

$$\Delta T = \gamma \Delta T_s + \Delta T_e \tag{3}$$

$$\Delta T = \gamma \frac{p'_e\, g'_1(\theta)\, g_2(\delta_{e'})}{k l_u} + \frac{p'_s\, g'_3(\eta_e)\, g_4(\theta)}{k l_d} \tag{4}$$

d'où

La formule (4) donne le résultat de l'effet des brouillages à la fois sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

Dans le cas où les fréquences de transposition des deux satellites ne sont pas les mêmes, différentes liaisons du réseau R' peuvent brouiller la liaison A à l'entrée du récepteur du satellite et du récepteur de la station terrienne; si A' et $\overline{A'}$ sont deux liaisons du réseau R', on peut écrire (les paramètres tels que a', b' et c' se rapportent à la liaison $\overline{A'}$):

$$\Delta T = \gamma \frac{p'_e\, g'_1(\theta)\, g_2(\delta_{e'})}{k l_u} + \frac{\overline{p'_s}\, \overline{g'_3}(\eta_e)\, g_4(\theta)}{k l_d} \tag{5}$$

On peut obtenir de la même façon la valeur $\Delta T'$ de l'accroissement de la température de bruit équivalente pour la liaison par satellite toute entière, rapporté à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne e'_R subissant les brouillages causés par le réseau R, en utilisant les formules:

$$\Delta T'_{s'} = \frac{p_e\, g_1(\theta)\, g'_2(\delta_e)}{k l_u} \tag{6}$$

$$\Delta T'_{e'} = \frac{p_s\, g_3(\eta_{e'})\, g'_4(\theta)}{k l_d} \tag{7}$$

Lorsque les fréquences de transposition des deux satellites sont les mêmes:

$$\Delta T' = \gamma' \frac{p_e\, g_1(\theta)\, g'_2(\delta_e)}{k l_u} + \frac{p_s\, g_3(\eta_{e'})\, g'_4(\theta)}{k l_d} \tag{8}$$

Lorsque les fréquences de transposition des deux satellites sont différentes (en appelant A et $\overline{A}$ deux liaisons du réseau R et en notant $\bar{a}$, $\bar{b}$, et $\bar{c}$ les paramètres correspondants):

$$\Delta T' = \gamma' \frac{p_e\, g_1(\theta)\, g'_2(\delta_e)}{k l_u} + \frac{\overline{p_s}\ \overline{g_3}(\eta_{e'})\, g'_4(\theta)}{k l_d} \tag{9}$$

Dans le cas de deux satellites à accès multiple, on doit faire le calcul pour chacune des liaisons par satellite établies par l'intermédiaire de l'un d'eux par rapport à toutes les liaisons par satellite établies par l'intermédiaire de l'autre.

Si seule la liaison montante ou la liaison descendante du réseau à satellite utile partage une bande de fréquences avec le réseau à satellite brouilleur, on obtiendra la valeur de ΔT à l'aide de la formule (3), en donnant à ΔT_s ou ΔT_e, selon le cas, la valeur zéro.

Cas II – Réseaux à satellites utile et brouilleur partageant la même bande de fréquences dans des sens de transmission opposés

Les notations étant les mêmes, l'accroissement de la température de bruit ΔT_s rapporté à la sortie de l'antenne de réception du satellite de la liaison A est donné par:

$$\Delta T_s = \frac{p'_s\, g'_3(\eta_s)\, g_2(\delta_{s'})}{k l_s} \tag{10}$$

L'accroissement apparent de la température de bruit équivalente de la liaison est alors donné par:

$$\Delta T = \gamma \Delta T_s \tag{11}$$

La valeur $\Delta T'$ de l'accroissement de la température de bruit équivalente de la liaison A' causé par les émissions brouilleuses du satellite associé à la liaison A est donnée par:

$$\Delta T' = \gamma' \Delta T'_{s'} = \gamma' \frac{p_s\, g_3(\eta_{s'})\, g'_2(\delta_s)}{k l'_s} \tag{12}$$

Si une bande seulement est partagée entre les liaisons A et A', il n'y aura de brouillage entre liaisons adjacentes par satellite que dans la liaison qui utilise la bande partagée pour sa liaison montante.

Les brouillages entre les stations terriennes associées aux liaisons dont les assignations de fréquence sont interverties doivent être traités selon des méthodes de coordination analogues à celles utilisées pour la coordination entre stations terriennes et stations de Terre.

2.2 *Examen de la discrimination de polarisation*

On peut aussi recourir à la discrimination de polarisation pour réduire la probabilité de brouillage entre réseaux à satellite lorsque différentes polarisations sont utilisées. Dans ce cas, l'accroissement apparent de la température de bruit équivalente de la liaison par satellite pourrait être déterminé au moyen des formules suivantes:

Cas I

$$\Delta T = \frac{\gamma \Delta T_s}{Y_u} + \frac{\Delta T_e}{Y_d} \tag{13}$$

Cas II

$$\Delta T = \frac{\gamma \Delta T_s}{Y_{ss}} \tag{14}$$

Les valeurs de γ, ΔT_s et ΔT_e étant celles qui sont indiquées au § 2.1 et les valeurs de Y_u, Y_d et Y_{ss} étant les facteurs de discrimination de polarisation (rapport numérique) relatifs respectivement à la liaison montante, à la liaison descendante et à la liaison inter-satellites. L'Appendice 29 au Règlement des radiocommunications donne des valeurs du facteur de discrimination de polarisation. Ces valeurs nécessitent un complément d'étude.

Etant donné que les facteurs de discrimination de polarisation dépendent du type de polarisation utilisé par chaque réseau et de la distribution statistique des niveaux de polarisation orthogonale, le facteur de discrimination de polarisation décrit ci-dessus ne sera pris en considération que si la polarisation a fait l'objet d'une notification ou d'une publication conformément à l'Article 11 du Règlement des radiocommunications.

2.3 *Comparaison entre l'accroissement relatif calculé et l'accroissement relatif prédéterminé de la température de bruit équivalente de la liaison par satellite*

Afin de déterminer la plus grande valeur de $\Delta T/T$, il est nécessaire de s'assurer que toutes les situations possibles ont été prises en compte. Les brouillages entre réseaux à satellite peuvent être maxima sur la liaison montante ou sur la liaison descendante; il importe donc de disposer d'un nombre suffisant de données pour effectuer les calculs nécessaires dans les deux situations pour chaque zone de service espace vers Terre et pour chaque utilisation prévue conformément à l'Appendice 4 du Règlement des radiocommunications. Le paramètre $\Delta T/T$ a pour formule:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_e}{T} + \frac{\gamma \Delta T_s}{T} \tag{15}$$

lorsque $\gamma \Delta T_s/T \gg \Delta T_e/T$, la plus grande valeur de $\Delta T/T$ est obtenue pour la valeur maximale de γ/T. Pour $\Delta T_e/T \gg \gamma \Delta T_s/T$, la plus grande valeur de $\Delta T/T$ est obtenue pour la valeur minimale de T. Pour déterminer cette valeur, il faut donc utiliser les valeurs de γ et T correspondant à la valeur maximale de γ/T ainsi que la valeur minimale de T et la valeur correspondante de γ. Il convient de faire des calculs pour les deux séries de valeurs de T et γ, telles que définies dans l'Appendice 4 du Règlement des radiocommunications. La plus grande des valeurs calculées de $\Delta T/T$ et $\Delta T'/T'$, exprimée en pourcentage, doit être comparée à des valeurs prédéterminées, prises égales à 4% des températures de bruit équivalentes correspondantes de la liaison (voir l'Appendice 29 du Règlement des radiocommunications):

- si la valeur calculée de $\Delta T/T$ est inférieure ou égale à la valeur prédéterminée, le niveau de brouillage causé par la liaison par satellite A' à la liaison par satellite A est admissible, quelles que soient les caractéristiques de modulation des deux liaisons par satellite et les fréquences exactes qu'elles utilisent;
- si la valeur calculée de $\Delta T/T$ est supérieure à la valeur prédéterminée, il convient d'effectuer un calcul détaillé en appliquant les méthodes et techniques définies dans les Rapports 388 et 455 au cours de la procédure de coordination entre administrations.

La comparaison entre la valeur calculée et la valeur prédéterminée de $\Delta T'/T'$ doit être faite de la même façon.

A titre d'exemple, on peut dire que, dans le cas d'une liaison par satellite dont les caractéristiques de fonctionnement sont conformes aux Avis en vigueur du CCIR, qui utilise la téléphonie à modulation de fréquence et dans laquelle le bruit total dans une voie téléphonique est de 10 000 pW0p, dont 1000 pW0p sont dus aux faisceaux hertziens de Terre et 2000 pW0p sont causés par d'autres liaisons par satellite, une augmentation de 4% de la température de bruit équivalente correspondrait à un niveau de bruit dû au brouillage pouvant atteindre 280 pW0p.

3. Méthode à appliquer pour des répéteurs fonctionnant avec traitement du signal

Dans les cas où une modification de la modulation ou de la régénération du signal se produit dans le satellite, le calcul des effets du brouillage de la liaison montante sur la qualité globale de la liaison nécessitera l'application de méthodes spéciales. Dans certains cas, tels que ceux des répéteurs analogiques fonctionnant avec traitement du signal (avec démodulation et remodulation du signal), on devrait pouvoir calculer pour γ une valeur appropriée qui tienne compte de ce traitement et permette d'établir une relation entre la liaison descendante et la contribution de la liaison montante au brouillage. Pour ces cas, le calcul serait possible en utilisant la formule (3) et le facteur γ modifié.

Dans d'autres cas, il peut être impossible de calculer une valeur de γ qui tienne raisonnablement compte du traitement du signal dans le satellite, par exemple avec des répéteurs-régénérateurs numériques. Il faudra alors traiter séparément les liaisons montantes et les liaisons descendantes et déterminer séparément les températures de bruit équivalentes sur ces deux types de liaisons. T_{seq} et T_{eeq} seraient les valeurs indiquées séparément pour les liaisons montantes et les liaisons descendantes, T_{seq} étant la température totale équivalente du système sur la

liaison montante, rapportée à la sortie de l'antenne de réception du satellite et T_{eeq} la température totale équivalente du système sur la liaison descendante, rapportée à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne. $\Delta T_s / T_{seq}$ et $\Delta T_e / T_{eeq}$ seront alors calculés et comparés avec une valeur prédéterminée. En attendant le résultat d'autres études, il conviendrait de fixer cette valeur à 4%, tant pour la liaison montante que pour la liaison descendante.

4. Détermination des liaisons par satellite à prendre en considération pour le calcul de l'accroissement de la température équivalente de bruit à partir des données fournies pour la publication préalable de données d'un réseau à satellite

Il faut déterminer le plus grand accroissement de température de bruit équivalente causé à n'importe quelle liaison de tout réseau à satellite existant ou en projet, sous l'effet des brouillages produits par le réseau à satellite considéré.

Pour chaque antenne de réception du satellite du réseau brouillé, il convient de déterminer l'emplacement potentiel le plus défavorable de station terrienne d'émission du réseau brouilleur en superposant, sur une carte de la surface terrestre, les zones de service Terre vers espace du réseau brouilleur aux contours de gain de l'antenne de réception de la station spatiale. L'emplacement potentiel le plus défavorable de station terrienne d'émission est celui en direction duquel le gain de l'antenne de réception du satellite du réseau brouillé est le plus élevé.

De même, pour chaque zone de service espace vers Terre du réseau brouillé, il convient de déterminer de façon analogue l'emplacement potentiel le plus défavorable de station terrienne de réception de ce réseau. L'emplacement potentiel le plus défavorable de station terrienne de réception est celui en direction duquel le gain de l'antenne d'émission du satellite du réseau brouilleur est le plus élevé.

Les gains des antennes de réception et d'émission cités dans les deux alinéas qui précèdent sont calculés sur la base des contours de gain de ces antennes, ainsi que le stipule l'Article 11 du Règlement des radiocommunications, dans le cadre de la procédure pour la publication anticipée. Si l'un des systèmes à satellites géostationnaires considérés, ou les deux, sont en service, il est préférable d'utiliser les diagrammes mesurés du rayonnement réel des antennes de satellite. Ces diagrammes mesurés permettraient une évaluation plus réaliste de la probabilité de brouillage dans les calculs ultérieurs.

Dans le cas où le satellite du réseau brouillé est équipé de simples répéteurs-changeurs de fréquence, ces déterminations d'emplacement se font par couple, d'une part, pour l'antenne de réception du satellite associée à un répéteur particulier et, d'autre part, pour la zone de service espace vers Terre associée à l'antenne d'émission de ce répéteur.

La méthode de calcul ci-dessus permet de la même façon de déterminer le plus grand accroissement de température de bruit équivalente subi par une liaison quelconque d'un réseau à satellite en projet sous l'effet des brouillages produits par n'importe quel autre réseau à satellite.

5. Examen des porteuses à bande étroite

La méthode de calcul décrite dans le présent Rapport sous-estime peut-être le brouillage que causent certaines porteuses de télévision à balayage lent à certaines porteuses à bande étroite (une seule voie par porteuse – SCPC). Les études se poursuivent au sein du CCIR, le but étant de réaliser une estimation précise des brouillages mutuels entre réseaux à satellite dans ces circonstances.

RAPPORT 870

MÉTHODES DE COORDINATION TECHNIQUE POUR LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION PAR SATELLITE

(Programme d'études 2R/4)

(1982)

1. Introduction

Il est nécessaire d'évaluer les brouillages potentiels entre réseaux à satellite; si le niveau de ces brouillages dépasse les limites admissibles, les parties concernées doivent fixer, par accord mutuel, un certain nombre de conditions pour l'exploitation de leurs réseaux respectifs. Les méthodes à utiliser pour déterminer le besoin de cette coordination ainsi que les procédures à suivre sont indiquées dans le Règlement des radiocommunications. Les méthodes et les procédures à suivre au cours du processus de coordination sont laissées à l'initiative des parties concernées. Cette coordination est normalement de nature bilatérale. L'objet du présent Rapport est de récapituler les diverses méthodes, procédures et techniques auxquelles on peut avoir recours pour la coordination.

2. Méthode générale

Dans le présent Rapport, le réseau qui souhaite accéder à l'orbite est appelé réseau A. On admet que les calculs de ΔT – effectués selon la méthode de l'Appendice 3 au Règlement des radiocommunications et publiés par l'IFRB pour des réseaux enregistrés *, pour des réseaux non encore enregistrés mais déjà coordonnés et pour des réseaux en cours de coordination – ont montré qu'il est nécessaire d'effectuer une coordination avec des réseaux B, C, D, etc., lesquels peuvent faire partie de l'une quelconque de ces catégories. Tous ces réseaux ont priorité par rapport au réseau A qui demande l'accès. Le processus de coordination est mis en route par la présentation d'une demande de coordination à la ou aux administrations concernées, avec copie à l'IFRB.

Les renseignements obligatoires demandés dans l'Appendice 3 qui sont soumis avec la demande de coordination ne sont pas suffisants pour servir de base à la coordination; en effet, ils permettent seulement de faire les calculs de ΔT, qui révéleront, dans un premier temps, si la coordination est nécessaire. Il faut par conséquent que l'exploitant demandeur fournisse des renseignements plus détaillés sur son réseau A, et qu'il demande à l'administration notificatrice de chacun des réseaux B, C, D, etc., avec lesquels la nécessité d'une coordination a été établie, de fournir également des renseignements plus détaillés. Ces renseignements plus détaillés qui peuvent être demandés et fournis sont énumérés dans l'Appendice 3; il faut souligner cependant que, dans de nombreux cas, d'autres renseignements encore devront éventuellement être échangés entre l'exploitant demandeur et la ou les administrations concernées.

Les renseignements ainsi échangés sont ensuite utilisés dans les calculs nécessaires à la coordination. Dans certains cas, cette coordination peut exiger – dans le réseau du demandeur, dans le réseau affecté, ou dans les deux – que des modifications soient apportées aux paramètres déjà échangés (y compris des modifications aux renseignements obligatoires au sens de l'Appendice 3), soit par voie de négociation, soit par application de mesures ou d'analyses plus récentes; dans certains cas également, la coordination peut conduire à des accords qui sont en contradiction avec les Avis du CCIR ou les dispositions du Règlement des radiocommunications; dans d'autres cas encore, elle peut aboutir à des contraintes particulières qui sont imposées d'un commun accord à l'exploitation de tel ou tel réseau.

Les résultats d'une procédure de coordination appliquée avec succès peuvent ne pas être rendus publics, à moins qu'ils ne soient fondés sur des renseignements facultatifs au sens de l'Appendice 3. Les accords n'entrant pas dans la catégorie de ces renseignements facultatifs mais qui sont directement liés au succès de la coordination n'ont pas besoin d'être publiés; cependant, il peut être dans l'intérêt de l'une et même des deux parties de présenter à l'IFRB un compte rendu complet de l'accord de coordination. Dans les cas où une administration demande l'assistance de l'IFRB pour effectuer la coordination, celui-ci, pour toutes les questions pratiques, agit au nom de cette administration dans la procédure de coordination et peut avoir accès automatiquement à tous les accords de coordination et à tous les détails s'y rapportant.

Si la procédure de coordination a été appliquée avec succès, l'administration qui recherche la coordination en informe l'IFRB en lui communiquant, en outre, la liste de tous les éléments d'information de l'Appendice 3 qu'elle a utilisés pour effectuer cette coordination; en même temps, elle notifie officiellement à l'IFRB ses assignations de fréquence et tous les autres éléments de notification (Appendice 3, sections G et H, fiche de notification d'assignation de fréquence à des stations terriennes et à des stations spatiales respectivement), remplissant ainsi toutes les conditions nécessaires à l'inscription des assignations dans le Fichier de référence.

Dans le cas où cette coordination entraînerait aussi des modifications des informations indiquées dans l'Appendice 3, notifiées antérieurement par d'autres administrations, les administrations concernées devraient aussi en aviser l'IFRB.

3. Le processus de coordination

Pour les besoins de l'exposé, on peut diviser le processus de coordination en trois phases.

La première consiste à examiner les transmissions (existantes ou projetées) des réseaux concernés et à faire une évaluation de leur interaction par référence à des critères de brouillage «normaux».

La deuxième phase du processus consiste à étudier les modifications éventuelles des éléments du plan de transmission (caractéristiques de transmission, plans de fréquences) ou des positions orbitales, qui pourraient conduire à une solution des problèmes de brouillage mis en lumière au cours de la phase 1. En règle générale, l'administration demanderesse pourra introduire ces modifications plus facilement que l'administration qui exploite déjà un réseau; toutefois, on ne peut pas s'attendre, au cours de la phase 2, que l'un ou l'autre des réseaux accepte d'imposer des contraintes importantes à son mode d'exploitation (existant ou projeté) et au type, à la distribution et à la qualité du service. Au cours de cette phase, il devrait être possible, moyennant une étude très approfondie de tous les paramètres techniques et d'exploitation, de résoudre des cas de brouillage spécifiques et, à première vue, relativement graves.

La troisième phase, si elle est nécessaire, consisterait à étudier et à négocier des modifications et des ajustements des systèmes, dans l'un des réseaux concernés ou dans les deux. Ces modifications peuvent influer sur la qualité et le type du service, et sur les possibilités de croissance future de l'un des réseaux, ou des deux.

---

* Un réseau enregistré est un réseau dont les assignations ont été inscrites dans le Fichier de référence de l'IFRB.

Lorsqu'on cherche à résoudre des cas de brouillage, il ne faut pas perdre de vue que toute solution particulière découverte pour les deux réseaux considérés est susceptible de créer des problèmes avec d'autres réseaux, ou d'aggraver des problèmes qui se posent déjà avec d'autres réseaux; ce point peut revêtir une importance particulière si l'on envisage un repositionnement des stations spatiales.

4. Considérations d'ordre technique

Fondamentalement, la coordination comporte deux étapes initiales:

- accord sur les critères de brouillage acceptable et
- accord sur le calcul du brouillage.

Les Avis du CCIR peuvent servir de base pour déterminer les critères de brouillage acceptable, mais d'autres critères peuvent être utilisés par accord mutuel. Les calculs nécessitent généralement la conversion des critères de sortie du récepteur en critères d'entrée aux fréquences radioélectriques, et la connaissance des paramètres du trajet de brouillage aux fréquences radioélectriques. Etant donné que de nombreux paramètres susceptibles d'être modifiés sont associés au domaine des fréquences radioélectriques, il peut être commode de classer les méthodes de coordination dans ce domaine, c'est-à-dire en fonction des critères applicables aux fréquences radioélectriques.

4.1 *Domaines de brouillage*

La première étape de la coordination consiste à identifier les domaines de brouillage. Chaque bande ou fraction de bande commune aux deux réseaux pour chaque faisceau d'antenne de satellite dans les deux secteurs spatiaux doit être identifiée. On identifie ensuite, dans chacune de ces bandes ou fraction de bande, les parties dans lesquelles les valeurs de sensibilité de réception (G/T) de la station spatiale et de la station terrienne et les valeurs de la p.i.r.e. de ces deux stations demeurent constantes pour les deux réseaux.

Cette méthode permet de déterminer tous les domaines de brouillage. Certaines parties du spectre, pouvant correspondre à une réutilisation des fréquences entre satellites, peuvent apparaître plusieurs fois. Lorsque les fréquences de la liaison montante et de la liaison descendante, ou les faisceaux d'antenne de satellite ou les deux à la fois, peuvent être associés par paires de diverses manières (commutation des faisceaux d'une station spatiale), il convient d'envisager toutes les configurations d'exploitation possibles. En outre, le nombre de domaines est habituellement limité, du moins dans les stations spatiales actuelles, par la disposition des répéteurs, et dans les stations spatiales simples, peut englober plusieurs ou tous les répéteurs. Lorsque deux stations spatiales utilisent chacune un seul faisceau d'antenne de satellite (c'est-à-dire des faisceaux d'émission et de réception à couverture commune) et que tous leurs répéteurs présentent des caractéristiques uniformes à l'intérieur de la bande de fréquences commune, il ne peut y avoir qu'un seul domaine de brouillage.

4.2 *Méthodes de coordination*

Le choix des méthodes à utiliser pour effectuer la coordination fait l'objet d'un accord entre les administrations participantes. Les caractéristiques des réseaux en cause et le niveau plus ou moins élevé du brouillage auront une influence sur le choix de la méthode à appliquer pour la coordination.

La coordination peut être effectuée:

- sur la base des contraintes de la *densité de puissance* à l'émission et de la sensibilité à la densité de puissance à la réception;
- sur la base de la *puissance de la porteuse* à l'émission et de la sensibilité de la puissance porteuse à la réception.

Les critères RF sont exprimés, dans le premier cas, par les expressions I_0/N_0 ou C_0/I_0 et, dans le second cas, par les expressions I/N ou C/I, dans lesquelles I, N, C et 0 représentent respectivement: I, la puissance de brouillage; N, la puissance de bruit interne sur la liaison; C, la puissance désirée de la porteuse et 0 la valeur moyenne du rapport puissance/Hz calculée dans une largeur de bande de référence.

4.2.1 *Méthode fondée sur la puissance de l'onde porteuse*

Cette méthode s'applique le mieux dans les cas suivants:

- dans les bandes de fréquences où fonctionnent des réseaux à satellite bien développés et dans lesquelles le nombre des satellites est relativement grand;
- pour les procédés de modulation bien définis, qui peuvent être d'un type quelconque, par exemple, SCPC, analogique, numérique, télévision à modulation de fréquence, etc.;
- dans les bandes de fréquences où cette méthode a déjà été utilisée sur une vaste échelle.

Les informations demandées à titre obligatoire dans l'Appendice 3 ne constituent pas une base suffisante pour effectuer la coordination selon les méthodes I/N ou C/I. Il est nécessaire que l'administration demanderesse ainsi que d'autres administrations exploitant des réseaux pour lesquels on a reconnu qu'une coordination est nécessaire, fournissent des renseignements plus détaillés sur leurs réseaux respectifs. Une coordination effectuée selon les méthodes I/N ou C/I exige l'échange de toutes les informations

demandées dans l'Appendice 3, y compris celles signalées par un renvoi indiquant le type de porteuse, le type de station terrienne, et le faisceau d'antenne de satellite dans toutes les bandes ou fractions de bandes communes aux deux réseaux, sans oublier, lorsque cela est possible, les plans de fréquences. Etant donné que cette information convient à l'application de la méthode C/I, il semble souhaitable de retenir cette méthode, étant donné qu'elle permet d'évaluer les brouillages avec une plus grande précision.

Les domaines de brouillages doivent d'abord être identifiés. Pour chacun de ces domaines, il est nécessaire de définir les types de porteuses d'émission qui sont utilisés ou dont l'utilisation est envisagée sur les deux réseaux. Si on ne connaît pas les plans de fréquences, il faut admettre, pour les porteuses des deux réseaux, la combinaison la plus défavorable au point de vue du brouillage. Dans la plupart des cas, cela correspondra à la coïncidence en fréquence des porteuses. Lorsque l'on connaît les plans de fréquences, ou lorsqu'une seule disposition des émissions est possible sur les deux réseaux pour un domaine de brouillage donné, les analyses des brouillages s'en trouvent simplifiées.

Pour chaque domaine, les brouillages causés par chaque type d'émission d'un réseau à chaque type d'émission d'un autre réseau sont calculés pour des assignations de fréquence coïncidentes (ou, lorsque cela est possible, pour les assignations de fréquence existantes ou envisagées) dans chaque sens (c'est-à-dire du réseau A vers le réseau B et vice versa). Chaque émission brouilleuse est supposée provenir de la station terrienne d'émission utilisant ou devant utiliser l'antenne de plus faible gain (ce qui correspond à la valeur la plus élevée de puissance isotrope rayonnée équivalente en dehors du faisceau principal). Lorsque la largeur de bande occupée par l'émission brouilleuse est nettement inférieure à la largeur de bande occupée par l'émission brouillée, il convient d'admettre que les émissions brouilleuses occupent entièrement, à des intervalles appropriés, la bande occupée par l'émission brouillée.

Il faut ensuite comparer les valeurs obtenues pour C/I aux valeurs mutuellement acceptables pour une source unique de brouillage. Si ces calculs indiquent que les valeurs obtenues pour C/I sont acceptables dans tous les cas, on peut conclure que la coordination a été effectuée avec succès.

Si les critères de brouillage ne sont pas satisfaits dans un ou plusieurs cas, chaque cas doit être examiné séparément. Si les critères ne sont que légèrement dépassés, il peut être convenu que ces niveaux de brouillage peuvent être tolérés par les deux réseaux. En particulier, l'administration qui recherche la coordination peut décider unilatéralement que les brouillages causés à son réseau, bien que dépassant légèrement la(les) valeur(s) des critères de brouillage, peuvent être acceptés et, s'il n'y a pas d'autre point de désaccord, peut déclarer que la coordination a d'ores et déjà abouti. Autrement, il pourra être nécessaire d'envisager les mesures suivantes pour satisfaire aux critères mutuellement acceptables.

4.2.2 *Méthode fondée sur la densité de puissance*

Cette méthode peut être largement appliquée dans les cas suivants:

- dans les bandes de fréquences où des réseaux à satellite se trouvent au stade initial de développement et dans lesquelles fonctionnent peu de satellites;
- pour les procédés de modulation donnant une densité spectrale de puissance presque uniforme, par exemple, modulations numériques;
- dans les cas où les premiers calculs de $\Delta T/T$ ont donné des valeurs qui sont acceptables pour chaque administration. Cela peut être le cas pour certains domaines communs entre les réseaux;
- dans les cas où l'on a une très grande souplesse d'exploitation dans l'un des réseaux, ou dans les deux, c'est-à-dire que l'on peut modifier les valeurs de la densité de puissance.

Lorsqu'on applique cette méthode, on peut faire l'évaluation initiale du brouillage en utilisant les renseignements obligatoires demandés dans l'Appendice 3, pour chaque domaine de brouillage. Cette évaluation peut permettre d'identifier les domaines particuliers où le brouillage potentiel est le plus gênant; elle permet également de déterminer si le brouillage dominant est celui de la liaison montante ou celui de la liaison descendante. Chaque partie pourrait utiliser les valeurs de I_0/N_0 qui sont acceptables pour elle, compte tenu des types de modulation qu'elle utilise.

Il arrive que les valeurs obtenues pour I_0/N_0 selon ces calculs soient acceptables par les deux parties, auquel cas la coordination trouve une conclusion favorable. Si les valeurs obtenues pour I_0/N_0 ne sont pas acceptables, un certain nombre de mesures peuvent être prises. Si les brouillages de la liaison montante dominent, on peut réduire les brouillages mutuels en modifiant la densité de puissance et le gain à l'émission sur la liaison montante. De plus, on peut introduire un nouveau mode d'accès par fractions de bande, c'est-à-dire modifier le domaine de brouillage de manière à renforcer l'homogénéité entre les deux réseaux, réduisant ainsi les brouillages mutuels. Par ailleurs, il peut être indiqué d'utiliser pour les largeurs de bande des valeurs moyennes différentes de celles qui sont spécifiées dans le Règlement des radiocommunications et qui soient plus représentatives des largeurs de bande effectivement employées. L'utilisation de ces largeurs de bande aura généralement pour effet d'abaisser les valeurs de I_0/N_0.

La méthode C_0/I_0 de coordination est pour l'essentiel une extension de la méthode I_0/N_0, mais comporte un paramètre supplémentaire: la densité de puissance minimale sur chaque réseau. Il peut se révéler que les valeurs obtenues pour C_0/I_0 sont mutuellement acceptables même si ce n'est pas le cas pour les valeurs obtenues pour I_0/N_0. Cette méthode permet d'envisager une compensation de la puissance des

répéteurs, c'est-à-dire d'augmenter leur puissance pour les émissions exposées à des brouillages importants et de réduire leur puissance pour les émissions exposées à des brouillages peu importants, ce qui permet d'éliminer ou d'atténuer la gêne apportée par un brouillage particulier. L'exploitation avec la compensation de puissance constituerait une mesure appropriée. Cette méthode C_0/I_0 nécessite un complément d'étude et des éclaircissements.

4.3 *Réduction du brouillage*

Après avoir identifié les domaines de brouillage, il faut évidemment rechercher quelles sont les possibilités qui s'offrent de réduire la gravité du problème. Il existe plusieurs possibilités en plus de celles indiquées plus haut, notamment celles qui sont énumérées ci-dessous (cette énumération ne correspond pas nécessairement à un ordre de préférence):

4.3.1 *Méthode fondée sur la puissance de la porteuse*

- concertation mutuelle en vue de l'établissement de plans de fréquences fondés sur le fractionnement ou le recours aux fréquences porteuses effectivement utilisées, afin de ramener les brouillages à un niveau acceptable;
- utilisation des diagrammes de rayonnement d'antennes (mesurés) effectivement utilisés, ou des meilleures estimations possibles de ces diagrammes lorsqu'il y a tout lieu de prévoir qu'elles seront plus satisfaisantes que celles spécifiées à l'origine dans les informations présentées conformément à l'Appendice 3;
- association d'émissions spécifiques et de stations terriennes spécifiques chaque fois que les données sont disponibles ou peuvent être déterminées. Par exemple, dans le cas de deux réseaux dont les zones de couverture sont distinctes ou se chevauchent partiellement, il est probable que les stations terriennes du réseau le plus éloigné de la zone de couverture de l'autre réseau causeront moins de brouillages et seront moins exposées aux brouillages que les stations terriennes plus rapprochées;
- recours à la compensation de la puissance dans les répéteurs. La compensation de puissance permet d'augmenter la puissance des répéteurs pour les émissions exposées à des brouillages importants et d'en réduire la puissance pour les émissions exposées à des brouillages peu importants, ce qui permet d'éliminer les brouillages dans certains cas ou d'en atténuer la gravité. La compensation de puissance serait appliquée en exploitation;
- la sensibilité aux brouillages «de Terre» dans les stations terriennes d'un réseau donné peut être d'un niveau si faible, ou peut être réduite dans des proportions telles qu'elle permet de reporter la tolérance de brouillage de Terre à celle qui est admise pour le brouillage du réseau inter-satellites, éliminant ainsi totalement ou partiellement les cas de brouillage inacceptable;
- il convient de tenir compte du caractère probabiliste des brouillages. En d'autres termes, lorsqu'il est très improbable que des brouillages inacceptables se produisent, ou s'il est probable qu'ils ne se produisent que pendant un faible pourcentage de temps, le critère de brouillage dû à une seule source peut être assoupli. Par exemple, dans le cas où des signaux analogiques de télévision accompagnés d'un effet de dispersion de l'énergie occasionnent des brouillages à des émissions de faible capacité, le pourcentage de temps pendant lequel seul le phénomène de dispersion peut être observé est généralement faible;
- l'administration qui recherche la coordination pourrait modifier un certain nombre des caractéristiques techniques de ses équipements (diagrammes de rayonnement des antennes, dimensions des antennes de stations terriennes, modelage des faisceaux d'antenne de satellite, par exemple) dans le souci de faciliter la mise en œuvre de changements techniques qui résoudraient en partie les problèmes de brouillage;
- les critères de brouillage pourraient être réévalués et assouplis par accord mutuel, pour certaines émissions, par exemple dans les cas où il n'est pas nécessaire que les circuits répondent à des normes de qualité recommandées au niveau international;
- dans certains cas, on pourrait tirer parti de la discrimination de polarisation;
- des niveaux de brouillage «inadmissibles» pourraient être acceptés temporairement lorsqu'un réseau existant doit être sous peu mis hors service dans un secteur spatial donné pour être remplacé par un réseau conforme aux critères approuvés;
- exclusion de certaines émissions de certains domaines de brouillage ou restriction à certains autres;
- recours à un type d'émission composite à destinations multiples et, par conséquent, moins sensible aux brouillages ou, au contraire, à un type d'émission sélectif isolant chaque destination afin de repérer la destination ou la source de brouillage «critique» et de prendre les mesures qui s'imposent;
- éviter certaines émissions ou certains modes de transmission (la modulation de fréquence à faible indice ou la transmission analogique de télévision à modulation de fréquence, par exemple) sans recourir à un procédé adéquat de dispersion d'énergie;

- restriction de la connectivité entre certaines stations terriennes ou certains types de stations terriennes pour certains domaines de brouillages;
- l'utilisation de certaines valeurs de gain pour les satellites (émission complète ou sélective) est à déconseiller. En règle générale, on évitera les valeurs de gain entraînant des sensibilités élevées sur les liaisons montantes ou des niveaux de puissance élevés sur ces liaisons;
- réduction du nombre de certaines émissions ou utilisation exclusive de ces émissions avec certaines stations terriennes ou certains types de stations terriennes;
- choix de nouveaux emplacements pour les stations spatiales et/ou de nouveaux angles de pointage pour les faisceaux d'antenne de satellite.

4.3.2 *Méthode fondée sur la densité de puissance*

- amélioration du diagramme de rayonnement des lobes latéraux de l'antenne par rapport aux diagrammes spécifiés à l'origine dans les données de l'Appendice 3;
- utilisation d'antennes de station terrienne de plus grandes dimensions;
- choix de nouveaux emplacements pour les stations spatiales et/ou de nouveaux angles de pointage pour les faisceaux d'antenne de satellite;
- utilisation de la polarisation orthogonale;
- conclusion d'un accord dans le cas où il est très peu probable que des brouillages inacceptables se produiront, ou bien dans le cas où ils se produiront pendant de faibles pourcentages de temps.

Le recours à certaines ou à l'ensemble de ces mesures, selon les besoins, permet d'effectuer avec succès la coordination selon la méthode I_0/N_0, qui ne fait essentiellement appel qu'aux données demandées dans l'Appendice 3.

4.4 *Méthodes de calcul*

L'application des méthodes de coordination décrites plus haut nécessite un certain nombre de calculs. Les calculs de I_0/N_0 sont similaires aux calculs de $\Delta T/T$ décrits dans l'Appendice 29; l'Annexe I au Rapport 455 décrit la méthode de calcul pour évaluer C/I. Celle-ci peut aussi être appliquée aux calculs de C_0/I_0. Les relations entre la méthode de calcul, le critère relatif à une seule source de brouillage et les valeurs du brouillage total entre réseaux sont expliquées dans les Rapports 454 et 455. Dans l'Annexe II au Rapport 455, on étudie une série de porteuses de type particulier au point de vue du brouillage:

- protection des porteuses MRF-MF,
- protection des porteuses AMRT,
- protection des porteuses SCPC-MDP.

Il existe un certain nombre d'Avis (par exemple, Avis 466, 483 et 523) qui traitent du cas du SFS. Lorsque le signal utile est du type téléphonie en modulation de fréquence (MRF-MF), la puissance de bruit dû au brouillage, en bande de base, est à comparer aux valeurs données dans l'Avis 466 (400 pW0p pour les anciens réseaux, 600 pW0p pour les nouveaux); lorsque le signal utile est du type téléphonie MIC-MDP, le niveau de brouillage est à comparer à la valeur donnée dans l'Avis 523 (4% du niveau de bruit à l'entrée du démodulateur, qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les bits); lorsque le signal utile est du type télévision en modulation de fréquence, le niveau de puissance de bruit dû aux brouillages est à comparer à la valeur donnée dans l'Avis 483 (4% du niveau de bruit total admissible en vidéofréquence).

Si les critères de brouillage du CCIR ne sont pas dépassés, on considère que le processus de coordination est achevé. Même si ces critères sont dépassés, les exploitants concernés peuvent décider d'accepter le surcroît de brouillage.

5. Moyens de calcul

Pendant la coordination détaillée, on observe les Avis pertinents du CCIR ainsi que certaines dispositions techniques du Règlement des radiocommunications. Il a toutefois été reconnu qu'il est nécessaire de poursuivre les études, afin de mettre au point des méthodes de coordination technique améliorées, cela en vue de rendre plus efficace et plus équitable l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et de simplifier les opérations de coordination. A cet égard, on peut avoir intérêt à élaborer des programmes d'ordinateur.

On peut faire une distinction entre programmes de synthèse et programmes d'analyse. La plupart des programmes de synthèse contiennent, il faut le reconnaître, des parties analytiques, mais leurs objets, leurs contraintes et leurs méthodes ne sont généralement pas les mêmes que dans les programmes purement analytiques. Aucun programme unique ne permet d'effectuer tous les calculs nécessaires pendant le processus de coordination mais, moyennant une conception appropriée, une série de programmes peut faciliter le processus d'une façon appréciable.

On a élaboré des programmes qui permettent d'optimiser les assignations de fréquences porteuses et de positions orbitales des satellites [CCIR, 1978-82]. Des programmes d'optimisation des assignations de fréquence peuvent être utilisés à différentes étapes de la coordination technique. Parmi leurs applications possibles, il convient de citer:

- la coordination préliminaire des assignations de fréquences porteuses, pour la mise en œuvre d'un nouveau système;
- la coordination et l'optimisation des assignations entre deux réseaux, par rapport à d'autres réseaux à satellites existants;
- l'optimisation des assignations de fréquences porteuses pendant la coordination multilatérale.

Les programmes relatifs aux espacements orbitaux permettent d'optimiser l'espacement de plusieurs satellites. Dans l'application de ces programmes, pendant le processus de coordination, on pourrait déterminer des emplacements orbitaux de remplacement, dans le cadre de la coordination bilatérale ou multilatérale.

6. Conclusions

On a donné, dans ce Rapport, une description générale des méthodes utilisées actuellement pour déterminer la nécessité d'une coordination entre les réseaux du service fixe par satellite, ainsi que les procédures à appliquer pour mener à bien chacune des phases de la coordination. Les puissantes méthodes d'analyse et les moyens de calcul électronique qui ont été mis au point ont permis de réduire le volume de travail nécessaire pour vérifier si un nouveau réseau peut être admis dans l'ensemble des réseaux déjà en exploitation. Beaucoup de ces auxiliaires de travail pourront être utilisés, tels quels ou après modification, pour obtenir une efficacité maximale dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires. Comme dans beaucoup d'autres domaines, ce problème doit faire l'objet d'un complément d'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/271 (Japon).

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/301 (Etats-Unis d'Amérique).

RAPPORT 871

CALCUL DE LA TEMPÉRATURE DE BRUIT ÉQUIVALENTE ET DU GAIN DE TRANSMISSION DE LA LIAISON PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1982)

1. Introduction

L'objet du présent Rapport est de fournir quelques directives afin de déterminer, pour des récepteurs-changeurs de fréquence de conception simple, les valeurs de la température de bruit équivalente et du gain de transmission de la liaison par satellite et, en particulier, les jeux de valeurs pour:

- la plus faible température de bruit équivalente de la liaison et le gain de transmission associé,
- la valeur du gain de transmission et la valeur associée de la température de bruit équivalente de la liaison qui correspondent au rapport maximal gain de transmission/température de bruit équivalente de la liaison par satellite.

Le Rapport 454 traite de la nécessité de telles valeurs.

La température de bruit équivalente d'une liaison par satellite (T), rapportée à la sortie de l'antenne de réception de la station terrienne, et le gain de transmission (γ) d'une liaison par satellite utilisant des répéteurs-changeurs de fréquence simples, peuvent être déterminés de plusieurs manières.

2. Formules générales

2.1 *Méthode 1*

Le gain de transmission s'exprime comme suit:

$$\gamma = \frac{p_s\, g_{ts}\, g_{re}\, A_{0u}}{p_e\, g_{te}\, g_{rs}\, A_{0d}} \tag{1}$$

où:

p_s : densité de puissance maximale par Hz fournie à l'antenne du satellite (moyenne établie sur la bande de 4 kHz la plus défavorable pour une porteuse de fréquence inférieure à 15 GHz, ou sur la bande de 1 MHz la plus défavorable au-dessus de 15 MHz) (W/Hz);

g_{ts} : gain de l'antenne d'émission du satellite dans la direction de la station terrienne de réception (rapport numérique de puissance);

g_{re} : gain de l'antenne de réception de la station terrienne dans la direction du satellite (rapport numérique de puissance);

A_{0u} : facteur d'affaiblissement de transmission en espace libre sur la liaison montante (rapport numérique de puissance);

p_e : densité maximale de puissance par Hz fournie à l'antenne de la station terrienne d'émission (moyenne établie sur la bande de 4 kHz la plus défavorable pour une porteuse de fréquence inférieure à 15 GHz, ou sur la bande de 1 MHz la plus défavorable au-dessus de 15 GHz) (W/Hz);

g_{te} : gain de l'antenne d'émission de la station terrienne dans la direction du satellite (rapport numérique de puissance);

g_{rs} : gain de l'antenne de réception du satellite dans la direction de la station terrienne d'émission (rapport numérique de puissance);

A_{0d} : facteur d'affaiblissement de transmission en espace libre sur la liaison descendante (rapport numérique de puissance).

2.2 *Méthode 2*

Le gain de transmission s'exprime comme suit:

$$\gamma = \frac{\text{p.i.r.e.}_s\, g_{re}\, BO_i\, 4\pi}{W_s\, g_{rs}\, A_{0d}\, BO_o\, \lambda^2} = \frac{(C/N_0)_d}{(C/N_0)_u}\,\frac{T_e}{T_s} \tag{2}$$

La température de bruit équivalente de la liaison s'exprime comme suit:

$$T = \frac{(C/N_0)_d}{(C/N_0)_t}\, T_e \tag{3}$$

où:

T_e, T_s : températures de bruit des systèmes de réception de la station terrienne et du satellite, rapportées à la sortie de l'antenne de réception (K);

$(C/N_0)_u$: rapport de la puissance de la porteuse à la densité de bruit, y compris seulement le bruit thermique et autres bruits de fond sur la liaison montante (rapport numérique);

$(C/N_0)_d$: rapport de la puissance de la porteuse à la densité de bruit, y compris seulement le bruit thermique et autres bruits de fond sur la liaison descendante (rapport numérique);

$(C/N_0)_t$: rapport de la puissance équivalente de la porteuse de la liaison complète à la densité totale de bruit, y compris la dégradation à l'intérieur du satellite (brouillage intrasatellite, intermodulation), le bruit thermique et autres bruits de fond (rapport numérique);

p.i.r.e.$_s$: p.i.r.e. du satellite à la saturation (W);

λ : longueur d'onde (m) correspondant à la fréquence utilisée sur la liaison montante;

BO_i : recul de puissance à l'entrée du répéteur (valeur numérique);

BO_o : recul de puissance à la sortie du répéteur (valeur numérique);

W_s : puissance surfacique à la saturation, au droit du satellite (W/m^2).

Le produit de la puissance surfacique à la saturation par le gain de l'antenne de réception du satellite ($W_s \times g_{rs}$) est le même à la crête du faisceau de l'antenne et à la limite du faisceau. De ce fait, le gain de transmission (γ) est maximum en même temps que la p.i.r.e. du satellite. Cette condition est remplie en crête de faisceau de l'antenne d'émission du satellite.

3. Calcul de deux jeux de T et γ

3.1 *Valeur minimale de T et valeur associée de γ*

La valeur minimale de la température de bruit équivalente de la liaison, T_{min}, peut s'exprimer comme suit:

$$T_{min} = T_e + \gamma_{min} \cdot T_s + T_a \tag{4}$$

où T_a est un autre bruit, d'origine interne et où γ_{min}, le gain de transmission qui lui est associé, est dérivé de la formule (2) en considérant la p.i.r.e. de saturation du satellite (p.i.r.e.$_s$) à la limite du faisceau.

3.2 *T et γ correspondant au rapport maximal γ/T*

La valeur de γ et la valeur associée de T, qui correspondent au rapport maximal gain de transmission/température de bruit équivalente de la liaison, peuvent être déterminées en portant à son maximum la grandeur:

$$\frac{\gamma}{T} = \frac{\gamma}{T_e + \gamma T_s + T_a} \tag{5}$$

Cette grandeur atteint son maximum quand γ atteint aussi sa valeur maximale, c'est-à-dire quand elle est calculée en crête du faisceau de l'antenne du satellite et non à la limite du faisceau; en conséquence:

$$\gamma_{max} = \gamma_{min}\, \Delta g \tag{6}$$

Δg : différence de gain de l'antenne d'émission du satellite entre la crête et la limite du faisceau (rapport numérique de puissance).

En conséquence, la valeur associée de la température de bruit équivalente de la liaison est donnée par la formule:

$$T = T_e + \gamma_{min}\, T_s\, \Delta g + T_a \tag{7}$$

4. Résumé

On trouve dans ce qui précède des formules pour déterminer T et γ. Les calculs doivent être effectués pour toutes les liaisons du réseau à satellites afin de choisir les jeux appropriés de valeurs qui conviennent au Rapport 454.

Ces méthodes ne doivent pas être utilisées pour calculer des valeurs de T et de γ à partir des renseignements notifiés ou publiés par d'autres administrations. Il faut un complément d'études concernant ces paramètres et leurs relations.

RAPPORT 455-3

PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES ENTRE DES RÉSEAUX DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 2/4, Programme d'études 2J/4)

(1970-1974-1978-1982)

1. Introduction

La mesure dans laquelle les mêmes bandes de fréquences peuvent être utilisées sans qu'il en résulte de brouillage inacceptable, par divers réseaux à satellites du service fixe par satellite, est une question d'une très grande importance, étant donné ses répercussions sur l'utilisation rationnelle du spectre des fréquences et de l'orbite des satellites géostationnaires.

Le partage des bandes de fréquences peut être affecté par:

- le nombre des satellites qui partagent une bande de fréquences donnée;
- les orbites sur lesquelles évoluent les satellites;
- le diagramme de rayonnement des antennes des stations terriennes et des stations spatiales;
- toute différence de polarisation entre les signaux utiles et les signaux brouilleurs;
- les densités surfaciques de puissance relatives des signaux utiles et des signaux brouilleurs, tant pour les satellites que pour les stations terriennes;
- le facteur de réduction de brouillage entre, d'une part l'entrée de la station spatiale et/ou le récepteur de la station terrienne, et d'autre part la sortie démodulée de la station terrienne;
- la fraction de la puissance totale admissible de bruit imputable au brouillage causé par d'autres réseaux à satellites.

Dans le présent Rapport, on examine les problèmes de partage des bandes de fréquences entre plusieurs réseaux à satellites.

2. Calcul des niveaux de brouillage

La mesure dans laquelle des réseaux à satellites peuvent utiliser en partage la même bande de fréquences dépend du rapport du niveau de la porteuse brouilleuse admissible au niveau de la porteuse utile.

2.1 *Rapport du niveau de la porteuse utile au niveau de la porteuse brouilleuse*

Le rapport de puissance «porteuse utile/porteuse brouilleuse sur la liaison descendante» dans une station terrienne peut s'exprimer par la relation:

$$(C/I)_D = R + G_4 - G_4(\theta) + Y_D \qquad (1)$$

où:

$(C/I)_D$: rapport de puissance porteuse utile/porteuse brouilleuse à l'entrée du système de réception (dB);

R : rapport de la densité surfacique de puissance du signal utile à la densité surfacique de puissance du signal brouilleur (dB);

G_4 : gain à la réception de l'antenne de la station terrienne pour le satellite utile (dB);

$G_4(\theta)$: gain à la réception de l'antenne de la station terrienne pour le satellite brouilleur (dB);

Y_D : discrimination de polarisation de l'antenne de la station terrienne à l'égard de la porteuse brouilleuse (dB).

On peut se servir d'une relation similaire pour déterminer le rapport «porteuse utile/porteuse brouilleuse» sur la liaison montante. L'Annexe I contient la description détaillée d'une méthode de calcul de ces rapports pour le brouillage entre réseaux de satellites géostationnaires.

2.2 *Rapport signal/bruit de brouillage après démodulation*

Dans les liaisons téléphoniques MRF-MF, le rapport de la puissance de la tonalité d'essai de 1 mW à la puissance de brouillage dans la voie téléphonique la plus défavorisée peut s'exprimer par la relation:

$$10 \log \frac{\text{tonalité d'essai de 1 mW}}{\text{puissance de brouillage non pondérée dans une voie téléphonique de 3,1 kHz}} = \left(\frac{C}{I}\right) + B \qquad (2)$$

où:

B : facteur de réduction de brouillage (dB) entre, d'une part l'entrée de la station spatiale et/ou le récepteur de la station terrienne, et d'autre part la sortie démodulée de la station terrienne (B est quelquefois appelé «facteur de transfert du récepteur»);

$\left(\frac{C}{I}\right)$: rapport de la puissance utile à la puissance brouilleuse à l'entrée du récepteur (dB).

La valeur du facteur de réduction de brouillage, B, dépend du type de modulation appliqué aux diverses porteuses. On peut utiliser une relation semblable à (2) pour les signaux analogiques en général, s'il est possible d'appliquer judicieusement le facteur B. Pour plus de renseignements, on se reportera au Rapport 388.

Le cas des transmissions numériques présente un certain nombre de difficultés, l'une des plus importantes étant due au fait que l'on n'a pas encore établi de façon sûre les caractéristiques et la qualité de fonctionnement des systèmes de modulation numériques qui sont susceptibles d'être utilisés dans les futurs réseaux à satellites du service fixe. Une autre difficulté tient à la nature de la détection numérique, qui fait qu'il est impossible de définir les caractéristiques de brouillage indépendamment des caractéristiques de bruit thermique (contrairement au cas des signaux analogiques au-dessus du seuil). En ce qui concerne les différentes méthodes de modulation que l'on peut rencontrer dans les émissions utiles et les émissions brouilleuses, on se reportera au Rapport 388 qui expose les techniques de calcul du bruit dû au brouillage dans les systèmes utilisés pour la téléphonie multivoie.

Pour ce qui est des brouillages causés aux systèmes de télévision à modulation de fréquence, on se reportera au Rapport 449.

2.3 *Exposition intermittente au brouillage*

De manière générale, dans le cas de deux satellites voisins, qu'ils appartiennent à un même système ou à des systèmes indépendants, le niveau de brouillage n'est pas le même selon que les satellites reçoivent ou ne reçoivent pas tous deux les émissions des stations terriennes avec lesquelles ils correspondent au moment où ils passent à proximité l'un de l'autre. Si tel est le cas, la méthode exposée dans le présent Rapport est applicable. Dans le cas contraire, par exemple si l'un des satellites est intentionnellement mis en fonctionnement à partir du sol, et l'autre non intentionnellement, l'effet d'un brouillage, quel qu'il soit, sera moins prononcé. Une telle situation peut se présenter par exemple dans un système à satellites non en phase, lorsque la séparation entre satellites adjacents est momentanément petite ou bien lorsqu'un satellite non utilisé se trouve au voisinage d'un

satellite géostationnaire. Dans ces cas, la réduction du gain d'antenne en dehors du lobe principal aura des effets à la fois sur l'éclairement du satellite brouilleur et sur la réception de son émission brouilleuse. Si la densité spectrale de puissance du répéteur de la station spatiale est fonction du flux que reçoit le satellite, la puissance surfacique produite par le satellite brouilleur dans la station terrienne sera inférieure à sa valeur de fonctionnement normale. Dans de telles situations, des écarts angulaires extrêmement petits entre les satellites pourraient être admissibles.

3. Niveaux admissibles de brouillage entre des réseaux utilisant des satellites géostationnaires

Le brouillage entre des réseaux utilisant des satellites géostationnaires ne varie pas beaucoup dans le temps; il est possible de coordonner les caractéristiques des systèmes de telle manière que la dégradation de la transmission dans les voies, sous l'effet de ce brouillage, ne dépasse pas un niveau acceptable.

3.1 *Importance du niveau de brouillage*

On continue à étudier très activement la définition d'un niveau acceptable de brouillage. On considère généralement que l'exploitant d'un système devrait pouvoir agir sur les caractéristiques de son système et que, par conséquent, le brouillage ne devrait pas influer considérablement sur la qualité de fonctionnement.

Cependant, le gain des antennes des stations terriennes et des stations spatiales diminue généralement de façon monotone lorsqu'on fait augmenter l'angle par rapport à la direction du gain maximal. Ces caractéristiques des antennes peuvent être le seul facteur de découplage entre deux réseaux, auquel cas il existe une relation inverse entre le niveau de brouillage et les angles de séparation. De ce fait, plus le brouillage admissible est élevé entre deux réseaux qui desservent plus ou moins la même zone de la surface terrestre, plus on peut admettre une valeur petite pour l'espacement orbital des stations spatiales de ces deux réseaux. De même, plus le brouillage admissible est élevé entre deux réseaux dont les stations spatiales occupent la même position orbitale, ou presque la même position, et desservent des zones différentes de la surface terrestre par l'intermédiaire d'antennes à faisceaux étroits, plus ces zones de service peuvent être proches les unes des autres; on pourra donc aussi réutiliser un plus grand nombre de fois la bande de fréquences dans différentes parties du monde.

Ainsi, plus le niveau admissible de brouillage est élevé, plus grande sera la «densité» de réutilisation possible des fréquences entre les réseaux, aussi bien sur l'orbite des satellites géostationnaires (espacement plus petit entre satellites) et sur la surface de la Terre (couverture plus dense). Il y a donc contradiction entre, d'une part, le désir de limiter à des valeurs relativement basses le brouillage entre réseaux de manière à assurer une «intégrité» raisonnable de conception et d'exploitation dans un réseau et, d'autre part, la nécessité non moins importante de porter à un maximum la réutilisation des fréquences et, par voie de conséquence, l'utilisation de l'orbite-spectre.

3.2 *Niveaux admissibles de brouillage dans une transmission téléphonique MRF-MF*

On admet généralement que le niveau maximal du bruit de brouillage qui peut être considéré comme admissible, bruit causé par tous les autres réseaux à satellites, se situe entre 10% et 25% du bruit total recommandé pour le circuit fictif de référence (Avis 353); on peut admettre un supplément de 10% pour le brouillage causé par les systèmes de Terre.

Si l'on adopte la plus petite de ces valeurs pour le brouillage entre réseaux, le brouillage total causé par toutes les sources ne dépasse pas 20%; avec ces niveaux de brouillage, l'exploitant du système peut bien contrôler la qualité de fonctionnement.

Si l'on prend la valeur la plus élevée, et si l'on admet que le brouillage causé par toutes les sources est additif, il semble que 35% du bilan de bruit total soient imputables à des sources de bruit sur lesquelles l'exploitant ne peut pas agir directement. Il est possible que, dans la réalité, les choses ne soient pas aussi défavorables. Par exemple, dans certaines stations terriennes, il se peut que le bruit de brouillage dû à d'autres réseaux tombe dans la même voie que le brouillage maximal dû à des systèmes de Terre. Une contribution de brouillage aussi élevée pourrait entraîner une augmentation du nombre des satellites pouvant être placés sur l'orbite, mais elle aurait aussi les inconvénients suivants:

- l'exploitant du système a beaucoup moins de possibilités d'agir sur la qualité de fonctionnement de son système;
- le brouillage prend des formes variées et peut entraîner des dégradations qu'il n'est pas possible de réduire simplement en limitant la puissance de bruit dans les voies; par exemple, il peut se produire un brouillage impulsif;
- la capacité de transmission d'un satellite se trouve réduite;
- la possibilité d'une grande réutilisation des fréquences dans un réseau à satellite – qui est, en elle-même, une méthode très puissante pour accroître l'efficacité d'utilisation de l'orbite et du spectre – se trouve réduite du fait de la présence d'un bruit externe aussi intense.

Ce problème général demande un complément d'étude.

Un brouillage unique causé à un réseau utile MRF-MF affecte certaines porteuses plus gravement que d'autres. L'effet du brouillage sur les diverses voies du système utile est également non uniforme, les voies supérieures de la bande de base étant affectées plus gravement que les autres. Ainsi, le brouillage maximal causé

par une source unique affectera un nombre relativement faible de voies dans le réseau utile. Un brouillage causé par un autre réseau exercera probablement ses effets les plus graves sur plusieurs voies. Le niveau total du brouillage reçu dans une voie quelconque sera donc inférieur à la somme des valeurs maximales de chaque source de brouillage.

3.3 *Niveaux admissibles de brouillage dans les transmissions de télévision à modulation de fréquence*

Pour les transmissions de télévision, les caractéristiques de qualité dans le circuit fictif de référence sont indiquées dans les Avis 354 et 567 en fonction des systèmes de télévision considérés. L'Avis 483 recommande que le bruit de brouillage entre réseaux ne dépasse pas 10% du bruit total dans le circuit fictif de référence. Il y aurait lieu d'étudier l'augmentation éventuelle de ce pourcentage.

D'une part, les transmissions de télévision à modulation de fréquence sont des transmissions à grande puissance, assez peu vulnérables, puisqu'elles doivent satisfaire à des conditions de seuil pour une largeur de bande relativement grande. Dans l'ensemble, une telle transmission n'est pas beaucoup plus vulnérable au brouillage qu'une porteuse de téléphonie MRF-MF à 972 voies; de ce fait, il est peu probable qu'elle représente le cas limite dans un processus de coordination visant à protéger des porteuses plus vulnérables. Cela resterait vrai si l'on devait appliquer un critère de brouillage fondé sur la vulnérabilité des ondes porteuses, comme indiqué au § 3.2. Il sera donc peut-être inutile, pour faciliter la coordination, d'accroître la marge de brouillage pour la télévision.

D'autre part, les effets de brouillage dans une transmission de télévision à modulation de fréquence dépendent beaucoup de la nature du brouillage, et il serait souhaitable d'étudier plus avant les caractéristiques suivantes: relation entre le bruit de bande de base dû au brouillage, la nature du signal brouilleur et la qualité subjective de l'image qui, comme dans le cas de la téléphonie MRF-MF, constitue le critère ultime, même s'il n'est pas quantifiable. Si l'on porte le bruit de brouillage admissible à 25% du bruit total dans la bande de base, cela pourrait bien entraîner une dégradation gênante de la qualité des images, pour certains types de brouillage. Le problème se trouve aggravé par le fait que, contrairement à la téléphonie MRF-MF, il n'est pas possible de faire un compromis entre le bruit interne et le bruit dû à un brouillage externe; une image de «bonne qualité» a tendance à être plus vulnérable subjectivement à certains types de brouillage qu'une image médiocre.

La conclusion est la suivante: une augmentation du critère de brouillage en télévision à modulation de fréquence pourrait, d'une part, être inutile et, d'autre part, difficile à réaliser.

3.4 *Niveaux admissibles de brouillage dans les transmissions numériques*

Pour les transmissions numériques, l'Avis 522 indique le critère de qualité sur la base du paramètre le plus important pour l'usager: le taux d'erreur sur les bits. Selon le critère de qualité à long terme, ce taux d'erreur ne devrait pas dépasser, à titre provisoire, la valeur 10^{-6}, moyenne sur 10 minutes, pendant plus de 20% d'un mois quelconque.

Pour établir un critère de brouillage qui, comme précédemment, traduirait une influence modérée du brouillage sur la qualité de fonctionnement globale, on pourrait rester dans le domaine du taux d'erreur sur les bits. Toutefois, contrairement au cas de la téléphonie analogique MRF-MF, il n'existe pas de relation linéaire simple entre les contributions au taux d'erreur dues au bruit interne, et la contribution due au brouillage. Il faut, par conséquent, relier le critère de brouillage au critère de qualité effectif, pris comme référence. On pourrait, par exemple, choisir comme critère de brouillage le brouillage qui élèverait le taux d'erreur sur les bits de $10^{-6}/k$ à 10^{-6}, k étant un nombre positif qui constituerait l'augmentation admissible du taux d'erreur sur les bits, sous l'effet du brouillage. Ce problème est étudié plus en détail dans le Rapport 793.

Cependant, comme il faut se référer au critère de qualité, on a constaté qu'il y avait avantage à exprimer le critère de brouillage sous la forme d'un paramètre de prédémodulation qui est généralement facile à spécifier. On a le choix entre le rapport porteuse/brouillage et le rapport bruit externe/bruit interne; on accorde la préférence à ce dernier critère, parce qu'il dépend très peu des caractéristiques particulières des équipements. Le critère de brouillage ainsi obtenu fait l'objet de l'Avis 558. Il faut aussi tenir compte du brouillage causé par des systèmes de Terre, dans les cas où une bande de fréquences est partagée avec ces systèmes.

Ce critère présente un autre avantage: les contributions dues aux divers cas de brouillage peuvent s'additionner en puissance. Pour les transmissions numériques, comme pour la téléphonie analogique MRF-MF, il est possible de faire, dans des limites raisonnables, un compromis entre bruit interne et bruit externe, et on peut prendre en considération une grande marge de brouillage numérique pour faciliter la coordination. L'influence du brouillage causé aux réseaux numériques dépend de la distribution d'amplitude et de phase de la porteuse brouilleuse. Un décalage de la fréquence porteuse d'un signal brouilleur a donc peu d'effet, si la plus grande partie du spectre brouilleur tombe dans la voie du signal utile.

3.5 *Relation entre le brouillage admissible total et les contributions individuelles*

La valeur recommandée pour le brouillage total maximal fournit une indication aux ingénieurs qui, pour la conception des systèmes, doivent tenir compte de ce niveau de brouillage et respecter en même temps les normes de qualité de fonctionnement du système. Il s'agit donc de choisir pour le signal de brouillage unique une valeur maximale telle que les séparations angulaires minimales des satellites soient adéquates et qu'il soit possible de mettre en place sur l'orbite tous les nouveaux réseaux à satellite nécessaires, comme d'assurer que le niveau total de brouillage dans un réseau ne doit pas dépasser la valeur recommandée.

Pendant un certain nombre d'années, les Avis du CCIR ont limité le niveau d'un brouillage unique à 4/10 du total admissible. Ce rapport correspond approximativement à la contribution au brouillage total de chacun des deux réseaux d'un couple de réseaux à satellites voisins, pris sur une population homogène équidistante, dont les satellites desservent essentiellement la même portion de surface terrestre.

En pratique, cette valeur unique de la limite s'est révélée non satisfaisante, parce que:

- elle n'est pas liée à un espacement défini de deux satellites voisins assurant la même couverture, et elle peut être revendiquée pour de très grands espacements. Il peut y avoir là un gaspillage de l'orbite; et
- elle ne garantit pas suffisamment que le brouillage cumulatif réel ne dépassera pas le total admissible pour lequel les réseaux ont été conçus.

Pour remédier à ces inconvénients, on peut appliquer une méthode qui vise à réaliser un degré raisonnablement élevé d'homogénéité parmi tous les réseaux fonctionnant dans une bande donnée du service fixe par satellite; pour ce faire, on impose des contraintes d'émission et de sensibilité aux systèmes d'émission et de réception, respectivement, des stations terriennes et spatiales de tous les réseaux. Ces contraintes seraient choisies de manière à permettre une mise en œuvre «raisonnable» et l'utilisation de caractéristiques «raisonnables» pour la mise en œuvre et la transmission, pour un espacement acceptable des satellites, entre des réseaux assurant la même couverture (par exemple, 4 à 10° d'arc). Cette méthode serait extrêmement efficace, puisqu'elle établit une barrière de brouillage absolu entre les réseaux. Mais elle serait en même temps relativement restrictive, puisqu'elle imposerait une limite aux caractéristiques techniques de conception et de fonctionnement dans tous les réseaux.

Cette stratégie est conçue pour limiter le brouillage total qui pénètre dans un réseau, quand tous les réseaux brouilleurs ont des zones de service qui recouvrent en partie la zone de service du réseau utile. C'est là une situation typique, par exemple, pour certains arcs de l'orbite des satellites géostationnaires qui sont intensément utilisés par des satellites à couverture mondiale. Il existe des risques supplémentaires de valeurs élevées du brouillage total lorsque les zones de service de certains des réseaux en question n'empiètent pas sur la zone de service du réseau utile et ce risque augmentera à mesure que l'orbite sera occupée par des satellites à couverture nationale utilisant des antennes à grand rendement.

Lorsque le réseau à satellite affecté d'un brouillage dû à d'autres réseaux utilise des émissions MRF-MF de différentes largeurs de bande, il est peu probable que les contributions de brouillage au niveau maximal, dues aux autres réseaux affectent toutes la même voie utile. En conséquence, le brouillage total dans la voie la plus affectée sera inférieur à la somme arithmétique de toutes les contributions de brouillage les plus élevées prises isolément. C'est pourquoi un rapport d'environ 1/3 entre le niveau maximal admissible d'une seule contribution et le niveau total admissible peut être valide.

Toutefois, pour les systèmes numériques à large bande, toutes les contributions de brouillage comprises dans la largeur de bande (avant démodulation) du système utile s'additionneront en puissance et affecteront toutes les voies du système; il n'y aura pas distribution aléatoire de l'incidence du brouillage entre les différentes voies. Dans ces circonstances, on peut clairement prévoir que le niveau total de brouillage sera notablement plus élevé. Il convient d'admettre un rapport plus élevé entre le niveau maximal admissible d'une seule contribution de brouillage et le niveau recommandé de brouillage total.

Pour les réseaux à satellite fonctionnant avec réutilisation de fréquence (1500 pW0p), l'Avis 466 recommande une valeur inférieure du niveau total de brouillage entre réseaux; en effet, un niveau donné de brouillage extérieur exerce, sur la capacité d'un tel réseau, un effet plus grand que sur celle d'un réseau ne fonctionnant pas avec réutilisation des fréquences, pour lequel le niveau admissible est de 2000 pW0p. L'Avis 523, qui concerne la téléphonie numérique, contient des recommandations correspondantes. Si, dans le cas de la réutilisation des fréquences, on appliquait également la valeur maximale du brouillage unique correspondant au cas de non-réutilisation, le niveau total de brouillage causé par d'autres réseaux à satellite dans certaines voies dépasserait peut-être 1500 pW0p lorsque l'arc d'orbite serait surchargé au voisinage du satellite utile. En revanche, si l'on recommandait des valeurs maximales différentes de brouillage unique dans les deux cas, on compliquerait le processus de coordination des fréquences et c'est pourquoi on utilise la même valeur.

Il est clair que toute tentative pour accroître les niveaux actuels de brouillage admissible doit être accompagnée de clauses de sauvegarde telles que le brouillage cumulé effectif ne dépasse pas sensiblement la marge totale augmentée, et que les études doivent être poursuivies à ce sujet.

Enfin, il existe des transmissions qui sont complètement incompatibles les unes avec les autres en ce qui concerne le brouillage mutuel dans une même voie. A titre d'exemple, on peut citer le brouillage qu'une porteuse à grande densité (par exemple, une porteuse de télévision MF avec dispersion insuffisante de l'énergie ou une porteuse MRF-MF à grande capacité avec faible indice de modulation) peut causer à une porteuse à faible capacité, par exemple une transmission SCPC analogique ou numérique. Si l'on juxtapose deux de ces transmissions compatibles, on obtient un très grand déséquilibre entre les caractéristiques des deux réseaux; une telle juxtaposition doit être évitée, que ce soit par convention ou au stade de la coordination.

4. Relations entre les rapports ΔT/T et les critères de brouillage par source unique

L'Annexe II au présent Rapport donne les résultats de calculs du rapport $\Delta T/T$ correspondant aux critères de brouillage par source unique applicables aux différents systèmes.

5. Moyens techniques permettant de faciliter la coordination entre des réseaux utilisant des satellites géostationnaires

Lorsqu'on effectue la coordination de deux réseaux à satellite au point de vue des brouillages mutuels, il est possible d'ajuster un certain nombre de paramètres dans un de ces réseaux, ou dans les deux, pour obtenir des niveaux de brouillage mutuellement acceptables. Ces ajustements peuvent consister notamment à modifier les paramètres des liaisons, ce qui entraîne des variations de la densité de puissance et de la sensibilité.

Le Rapport 453 signale quatre facteurs fondamentaux qui limitent la densité de puissance:

- la densité de puissance sur la liaison montante (P_u),
- la densité de puissance brouilleuse contre laquelle un récepteur de satellite est protégé (I_u),
- la densité de puissance sur la liaison descendante (P_d) et
- la densité de puissance brouilleuse contre laquelle un récepteur de station terrienne est protégé (I_d).

Il est peut-être possible de réaliser la coordination sur cette base, c'est-à-dire sur la base de valeurs limites acceptées pour ces quatre paramètres.

Il est possible également d'effectuer la coordination, sur la base des quatre paramètres en question, en réaménageant les accès aux répéteurs, pour réduire au minimum les effets imputables aux différences entre les gains d'antenne des stations terriennes ou entre les rapports G/T.

Si, au stade de la coordination entre deux systèmes, il apparaît que les critères de brouillage ne peuvent pas être satisfaits dans toute la bande de fréquences, on peut être amené à fractionner cette bande, ce qui conduit à coordonner des fractions de largeur de bande plus homogènes. Il est possible de réduire considérablement les valeurs des rapports (P_u/I_u) et (P_d/I_d) en recourant à une méthode de fractionnement de la bande de fréquences grâce à laquelle la coordination pourrait être réalisée avec des valeurs différentes des quatre paramètres, dans des fractions différentes d'une bande. Il faut prendre en considération, en premier lieu, le brouillage causé par des porteuses à grande densité spectrale, par exemple la télévision à modulation de fréquence. Dans toute la mesure possible, ces porteuses doivent être confinées dans une portion de la bande radioélectrique ne contenant pas de transmissions très vulnérables, par exemple la téléphonie SCPC. Si les mêmes dispositions sont prises dans les deux réseaux en ce qui concerne les répéteurs, on pourrait obtenir ce résultat en affectant des répéteurs différents à chaque type de transmission. Si la coordination est effectuée à un stade précoce des études, une autre solution possible consisterait à élaborer les plans de fréquences des répéteurs de telle façon que les bandes de croisement des filtres, dans un des réseaux, tombent à l'intérieur de la largeur de bande utilisable de l'autre réseau. De cette façon, il est possible de placer les porteuses à densité spectrale maximale d'un des réseaux à l'intérieur des bandes de garde de l'autre réseau.

Si cela n'est pas possible, on pourrait être amené à réduire la densité spectrale brouilleuse en améliorant la méthode de dispersion d'énergie de la porteuse de télévision. L'étalement d'une porteuse vidéo, tel qu'on le pratique habituellement pour réduire le brouillage causé à des porteuses multivoies de petite capacité, protège assez mal une porteuse SCPC puisqu'il comporte une dispersion de l'énergie de la porteuse vidéo (qui, autrement, est rarement soumise à une excursion de fréquence) à la fréquence de trame vidéo, soit 50 ou 60 Hz. Pour une porteuse SCPC, l'énergie de la porteuse vidéo, dispersée à une fréquence aussi basse et étalée sur un ou, au mieux, quelques mégahertz, est assimilable au brouillage impulsif qu'elle causerait à sa pleine puissance, avec un coefficient d'utilisation égal au rapport de la largeur de bande occupée par la porteuse SCPC à l'excursion de fréquence crête-à-crête de l'énergie dispersée.

On a proposé dans ce cas, pour réduire davantage le brouillage, une méthode d'étalement pour signaux vidéo MF analogiques, qui a été analysée théoriquement et mesurée expérimentalement. Cette méthode met en œuvre simplement une fréquence de dispersion plus élevée, en principe du même ordre de grandeur que le débit d'information appliqué à la porteuse SCPC. En pratique, il s'agit approximativement d'une fréquence de dispersion égale à la fréquence de ligne vidéo. On a démontré que le signal vidéo, dans le cas d'une dispersion à la fréquence de ligne, ne nécessite pas une augmentation de la largeur de bande radioélectrique. Le brouillage affectant la porteuse SCPC est alors assimilable à celui que causerait un signal de bruit blanc réparti uniformément sur la largeur de bande de la dispersion, parce que le filtre de réception SCPC, au lieu de suivre la porteuse vidéo dans son balayage effectif, se comporte plutôt comme si elle occupait à chaque instant une bande de fréquences d'une largeur appréciable. Ainsi, si on utilise une dispersion à la fréquence de ligne, on obtient pour le rapport porteuse/brouillage (C/I) une valeur comparable à celle que l'on obtient pour d'autres types de transmissions.

L'étalement par un signal triangulaire ou en dents de scie semble être efficace, et l'on pense pouvoir éliminer ce signal facilement au récepteur, qu'il y ait l'une ou l'autre de ces formes d'onde. Les résultats des premiers essais effectués sont très prometteurs, mais il faudra pousser les recherches encore beaucoup plus loin, notamment par des évaluations subjectives et des mesures objectives. Pour plus de renseignements, voir l'Annexe II au Rapport 384.

Il convient de noter qu'une dispersion à une seule fréquence d'un signal vidéo MF analogique, à la fréquence de ligne vidéo, risque d'être peu efficace pour réduire les brouillages causés à des porteuses téléphoniques multivoies MRF-MF ou à d'autres porteuses vidéo MF analogiques, si la fréquence de dispersion apparaît dans la bande de base d'autres porteuses qui utilisent certains éléments du système de transmission en partage avec la porteuse dont l'énergie est dispersée.

Que la dispersion se fasse à la fréquence de ligne ou à la fréquence de trame, si la séparation de fréquence entre la porteuse SCPC et la porteuse vidéo est légèrement supérieure à la moitié de la somme suivante: largeur de bande de dispersion d'énergie + excursion crête-à-crête en basse fréquence de la porteuse vidéo, il ne peut pas y avoir de brouillage au niveau de la porteuse vidéo complète.

Les opérations de coordination pourraient être encore facilitées par le recours à l'entrelacement des fréquences. La mesure dans laquelle il est possible d'obtenir un espacement plus petit entre des satellites et une meilleure utilisation de l'orbite et du spectre radioélectrique, en entrelaçant les fréquences porteuses d'un satellite avec celles d'un satellite voisin, dépend, étroitement, du type de modulation (par exemple, MF ou MDP) et de la méthode d'accès multiple au satellite (par exemple, porteuse unique ou AMRF) appliquée aux porteuses utile et brouilleuse. La réduction que l'on peut obtenir pour l'espacement entre satellites peut être exprimée en fonction d'une meilleure tolérance de brouillage à fréquence radioélectrique, laquelle peut varier de 0 à 12 dB environ selon le type de modulation et la méthode d'accès multiple utilisés.

En ce qui concerne la téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence et à modulation de fréquence, on peut améliorer le rapport porteuse/brouillage requis en utilisant des fréquences porteuses entrelacées. Cela est intéressant pour l'étude de l'efficacité d'utilisation de l'orbite. On constate que cette amélioration peut atteindre environ 12 dB selon les indices de modulation.

Dans le cas de systèmes qui emploient diverses méthodes de modulation et d'accès multiple au satellite, on ne peut retirer le maximum d'avantages de l'entrelacement des fréquences que par une coordination appropriée et par l'attribution du trafic ou des modes de transmission à des canaux radioélectriques du satellite déterminés. Toutefois, il se peut que cette procédure ne soit pas applicable en pratique, car il est difficile de prévoir avec précision les exigences en matière de trafic ou de nouvelles applications et quelle sera la déperdition de souplesse en assignant de nouveau le trafic. Comme on l'a vu plus haut (§ 3.4), l'entrelacement des signaux numériques ne permettrait guère, dans ce cas, d'améliorer les conditions à satisfaire en ce qui concerne l'espacement des satellites; toutefois, cela ne constitue probablement pas un facteur limitatif, dans la mesure où l'espacement requis dans le cas des signaux analogiques est généralement plus grand.

Etant donné les considérations qui précèdent, les avantages de l'entrelacement des fréquences des satellites peuvent, en pratique, se limiter à relativement peu d'applications.

La coordination peut être facilitée par un réaménagement des porteuses entre les répéteurs, ayant pour objet de réduire les brouillages mutuels au minimum. On a mis au point, pour ce cas particulier, des techniques informatiques qui permettent d'obtenir des dispositions optimales des porteuses.

La coordination peut aussi être facilitée par un ajustement des positions des porteuses à l'intérieur de chaque répéteur. Il existe aussi des techniques permettant d'optimiser ce type de réaménagement des porteuses.

Il y a lieu de noter cependant que cette coordination par réaménagement des porteuses dans un réseau AMRF pourrait être la cause d'importantes difficultés pour l'exploitation, faute de pouvoir faire face aux changements intervenant dans les besoins des usagers. Néanmoins, avec l'arrivée de nouveaux systèmes, cette coordination poussée pourrait se réléver nécessaire dans l'avenir.

6. Séparation des satellites dans l'espace et dans le temps

6.1 *Introduction*

Le partage des bandes de fréquences entre satellites appartenant à des réseaux différents est possible, à condition qu'on maintienne entre leurs satellites un écart angulaire suffisant ou que l'émetteur de l'un soit déconnecté lorsque l'écart angulaire devient insuffisant. Les méthodes permettant de déterminer les séparations requises dans l'espace et dans le temps entre des satellites géostationnaires et des satellites non géostationnaires sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

6.2 *Ecarts angulaires entre satellites géostationnaires*

Des calculs effectués dans un document de l'U.R.S.S. montrent que, dans la plupart des cas, les écarts angulaires à prévoir entre satellites ne sont pas excessifs (de l'ordre de 1° à 6°). Toutefois, lorsqu'il s'agit de systèmes multivoies à faible indice de modulation ou de systèmes à une seule voie, il faut prévoir des écarts angulaires plus importants.

6.3 *Brouillages entre systèmes à satellites géostationnaires et systèmes à satellites non géostationnaires*

6.3.1 *Séparation dans l'espace au moyen de décalages orbitaux*

L'écart angulaire entre des satellites sur orbite inclinée et des satellites géostationnaires ne peut être maintenu que si certaines parties de l'orbite de satellites géostationnaires sont réservées aux traversées du plan équatorial par des satellites non géostationnaires.

Cela impose une limite au nombre de satellites géostationnaires utilisables.

6.3.2 *Séparation dans le temps et dans l'espace*

La séparation des satellites dans l'espace et dans le temps repose sur le principe suivant: durant les périodes où la séparation dans l'espace devient insuffisante, on a recours à la séparation dans le temps en mettant fin aux émissions de l'un des satellites qui causent les brouillages mutuels.

Un système à satellites non géostationnaires comporte des moyens de commutation entre satellites, de réorientation des antennes et de poursuite qui interviennent normalement dans le fonctionnement. Le transfert du trafic d'un satellite sur le point d'être déconnecté pour des raisons de brouillage à un autre satellite ne compliquera pas outre mesure l'ensemble du système.

La Fig. 1 représente la zone dans laquelle on peut avoir un brouillage entre satellites géostationnaires. Il s'agit du volume limité par la surface de révolution autour de l'axe de la Terre, engendrée par des droites tangentes à la Terre qui coupent le plan de l'équateur à l'altitude de l'orbite géostationnaire.

Le brouillage entre satellites géostationnaires et non géostationnaires peut être éliminé si l'on met fin aux émissions en provenance de l'un d'eux lorsque l'écart angulaire, vu des stations terriennes qui communiquent par l'intermédiaire de ces satellites, devient insuffisant. Si les stations terriennes fonctionnant avec un satellite non géostationnaire sont équipées pour permettre la poursuite, la commutation et la réorientation rapide des antennes, il doit être techniquement possible de mettre fin aux émissions de ce satellite, lorsque sa séparation spatiale par rapport à un satellite géostationnaire devient insuffisante. Lorsque l'orbite des satellites géostationnaires sera saturée, les satellites non géostationnaires devraient être techniquement capables de mettre fin à leurs émissions lorsqu'ils se trouveront dans la zone de brouillage indiquée sur la Fig. 1. Toutefois, c'est aux administrations intéressées qu'il appartient de prendre une décision en la matière.

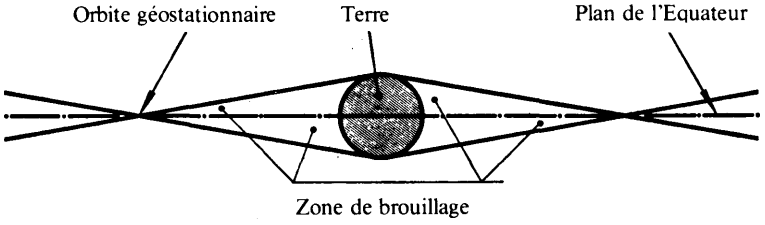


FIGURE 1 — *Zone de brouillage entre satellites géostationnaires et satellites non géostationnaires*

7. Résumé

La présente étude montre que l'écart angulaire minimal entre satellites dépend du niveau acceptable du bruit de brouillage dans les voies de la bande de base (brouillage causé par les autres satellites et par les stations terriennes).

Le partage des bandes de fréquences entre réseaux à satellites géostationnaires est possible, à condition qu'on maintienne entre eux un écart angulaire suffisant. L'espacement effectif requis entre satellites géostationnaires dépend des paramètres du système, par exemple la p.i.r.e., les diagrammes de rayonnement des antennes des stations terriennes, etc.; il est impossible de le définir actuellement, même de façon approximative.

Le partage des bandes de fréquences entre réseaux à satellites géostationnaires et non géostationnaires est possible, à condition que l'un des satellites cesse ses émissions dès que l'écart angulaire devient insuffisant. C'est aux administrations intéressées qu'il appartient de décider quel satellite doit cesser d'émettre.

L'espacement effectif requis entre les satellites dépend aussi du niveau admissible du brouillage total et de la manière dont ce brouillage total est constitué à partir des brouillages individuels des satellites. L'optimisation de ces niveaux et la détermination des moyens nécessaires pour les contrôler est un problème important qui devra être étudié au titre du Programme d'études 2J/4.

ANNEXE I

MÉTHODE DE CALCUL DES RAPPORTS PORTEUSE UTILE/PORTEUSE BROUILLEUSE DANS LES RÉSEAUX A SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

1. Introduction

L'importance des brouillages constatés entre deux réseaux à satellites dépend de leurs paramètres de fonctionnement. Pour évaluer les brouillages mutuels entre des réseaux de radiocommunications par satellite, on divise généralement le calcul en deux parties. Dans la première partie, on détermine les rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse entre deux ondes porteuses quelconques susceptibles de se brouiller, aux bornes d'entrée du récepteur correspondant. Dans la seconde partie, on établit une relation entre ces rapports et la puissance de bruit dans les voies de la bande de base. La présente Annexe décrit la méthode qui permet de calculer les rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse. Pour la seconde partie on devra se référer au Rapport 388.

2. Méthode

Les Fig. 2a et 2b montrent des trajets de brouillage entre deux réseaux à satellites. Les valeurs des espacements angulaires topocentriques minimaux des satellites (vus d'un point de la Terre) doivent être déterminées en tenant compte de la valeur nominale de l'espacement angulaire géocentrique, des incertitudes sur la position des satellites (longitude des nœuds orbitaux et inclinaison des orbites) et des emplacements géographiques respectifs des stations terriennes. L'emploi de l'espacement angulaire géocentrique θ au lieu de celui de l'espacement angulaire topocentrique facilite le calcul; il est, de plus, justifié du fait que les deux angles sont presque égaux. En outre, l'espacement angulaire topocentrique étant toujours supérieur à l'espacement angulaire géocentrique, le calcul fondé sur ce dernier donne des résultats plus prudents.

Les satellites de radiocommunication nécessitent des assignations dans deux bandes de fréquences, une pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante. Habituellement, ces bandes de fréquences sont associées par paires, une bande pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante. Le cas I ci-dessous décrit les possibilités du brouillage entre deux réseaux qui ont de telles assignations; ainsi, le brouillage provenant d'une liaison montante affecte la liaison montante «utile» et un brouillage provenant d'une liaison descendante affecte la liaison descendante «utile». Cependant, il devrait être possible pour certains systèmes d'utiliser des bandes de fréquences interverties, par rapport au cas I; la bande de la liaison montante d'un réseau est alors la même que celle de la liaison descendante d'un réseau utilisant un satellite adjacent; dans ces conditions, le brouillage provenant d'une liaison montante affecte la liaison descendante «utile» et le brouillage provenant d'une liaison descendante affecte la liaison montante «utile»; ceci est le cas II.

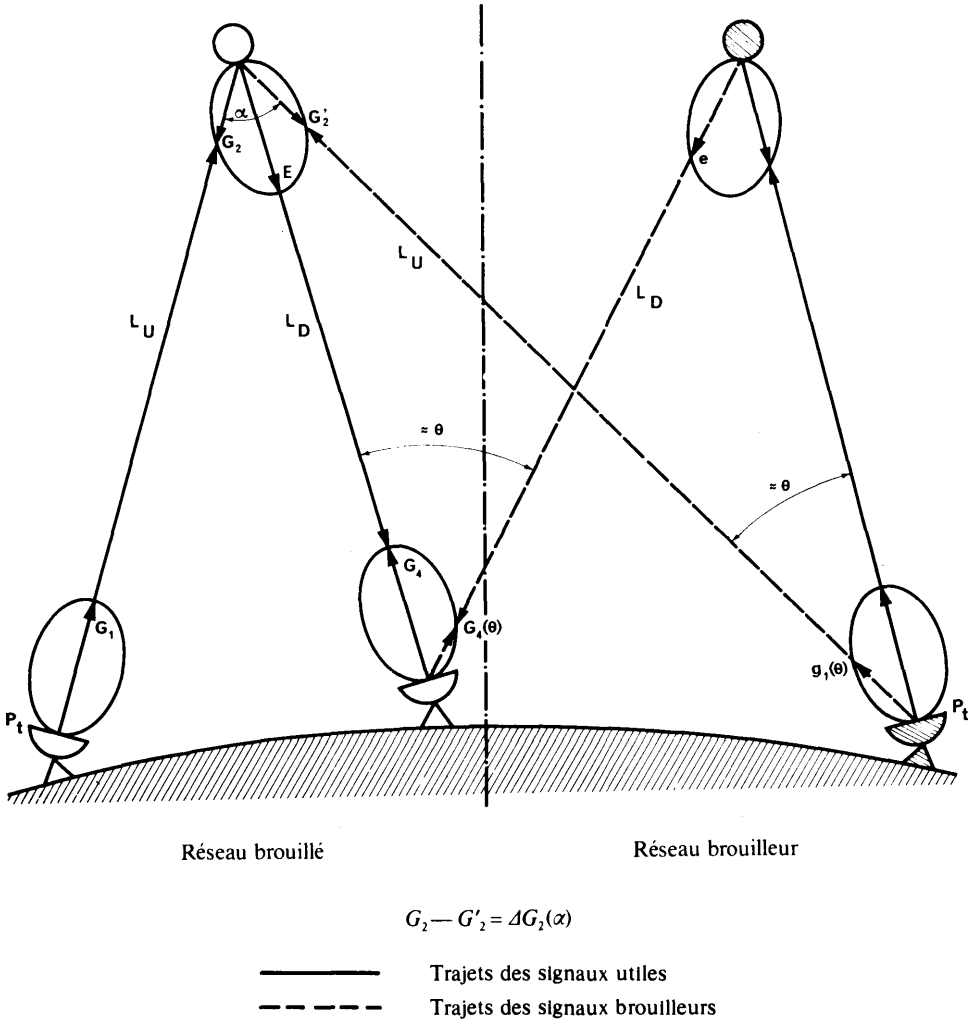


FIGURE 2a – *Géométrie des brouillages entre deux réseaux à satellite, cas I – liaison montante du réseau utile partageant les fréquences avec la liaison montante du réseau brouilleur*

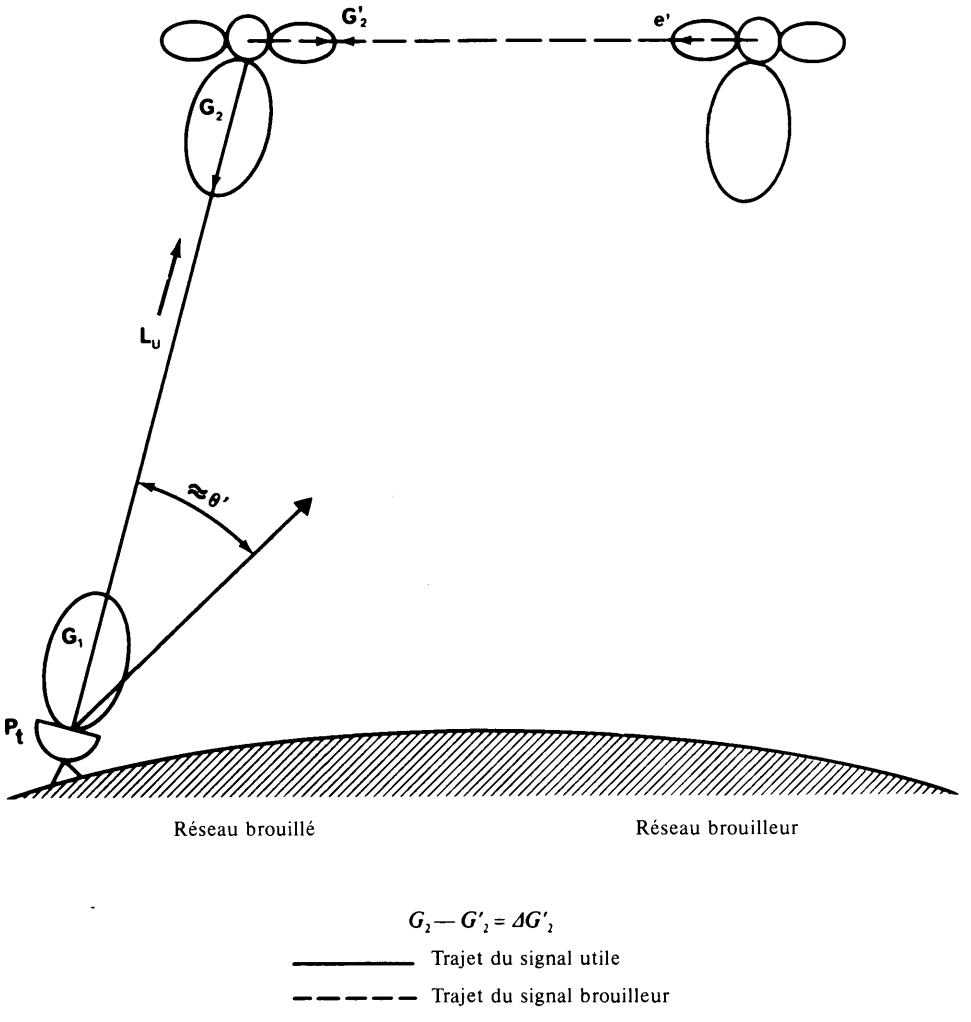


FIGURE 2b – *Géométrie des brouillages entre deux réseaux à satellite, cas II – liaison montante du réseau utile partageant les fréquences avec la liaison descendante du réseau brouilleur*

2.1 *Cas I*

On suppose les conditions de propagation suivantes lors du calcul des rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse sur les liaisons montante et descendante:

- en raison des effets de la propagation et des précipitations locales, les signaux utiles et les signaux brouilleurs émis par des stations terriennes situées en différents points de la surface terrestre sont sujets à des fluctuations. A moins que la p.i.r.e. de la station terrienne ne soit réglée de telle sorte que les niveaux des signaux reçus par les satellites demeurent constants, il conviendra de prévoir une marge dans l'équation concernant la liaison montante, pour calculer la valeur moyenne du brouillage;
- le rapport entre les niveaux respectifs du signal utile et du signal brouilleur ne varie pas en fonction du temps sur la liaison descendante. Compte tenu de la discrimination insuffisante exercée par les antennes à effet directif des stations terriennes, tout brouillage assez intense pour avoir une influence appréciable ne saurait provenir que de satellites proches de celui du réseau utile. Les signaux utiles et brouilleurs subiront donc un affaiblissement égal lors des variations des caractéristiques de propagation, puisqu'ils traversent les mêmes régions perturbées. En conséquence, les fluctuations observées sur le signal utile reçu n'auront aucun effet significatif sur le niveau de brouillage produit dans la bande de base, et l'on peut généralement ne pas prévoir de marge dans le cas de la liaison descendante.

Dans la première partie du calcul, il faut résoudre les deux formules suivantes:

$$(C/I)_U = P_t + G_1 - \Delta L_U - M_U - p_t - g_1(\theta) + \Delta G_2 + Y_U \quad \text{dB} \tag{3}$$

et

$$(C/I)_D = E + G_4 - \Delta L_D - e - G_4(\theta) + Y_D \quad \text{dB} \tag{4}$$

où:

$(C/I)_{U,D}$: rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante (dB);

P_t, p_t : puissances d'émission de la porteuse utile et de la porteuse brouilleuse, fournies aux antennes des stations terriennes correspondantes (dBW);

G_1, G_4 : gains à l'émission et à la réception des antennes de la ou des stations terriennes «utiles» (dB);

ΔL_U : différence d'affaiblissement sur les liaisons montantes vers le satellite utile, à partir des deux stations terriennes,
$\Delta L = L_{utile} - L_{brouilleur}$ (dB);

ΔL_D : différence d'affaiblissement sur les liaisons descendantes vers la station terrienne «utile» à partir des deux satellites; ΔL défini comme ci-dessus (dB);

M_U : marge pour la liaison montante dans le réseau utile (dB);

$g_1(\theta)$: gain d'antenne dans la station terrienne brouilleuse dans la direction du satellite utile (dB);

(θ) : valeur minimale de l'espacement angulaire géocentrique des satellites, vu de la station terrienne brouilleuse;

ΔG_2 : différence entre les gains d'antenne (réception) du satellite utile, dans la direction des deux stations terriennes,
$\Delta G_2 = G_{2\,utile} - G_{2\,brouilleur}$ (dB);

Y_U : discrimination de polarisation minimale entre l'onde porteuse brouilleuse sur la liaison montante et l'antenne de réception du satellite utile (dB);

Y_D : discrimination de polarisation minimale entre l'onde porteuse brouilleuse sur la liaison descendante et l'antenne de réception de la station terrienne «utile» (dB);

E, e : p.i.r.e. de la porteuse utile et de la porteuse brouilleuse dans la direction de la station terrienne «utile» (dBW);

$G_4(\theta)$: gain de l'antenne de la station terrienne «utile» dans la direction du satellite brouilleur (dB).

Notes relatives à certains facteurs utilisés dans les équations précédentes:

- Les puissances et les gains d'antenne correspondant au réseau utile sont désignés en lettres capitales; les puissances et les gains correspondant au réseau brouilleur sont désignés en lettres minuscules. Les indices associés aux gains des diverses antennes correspondent au trajet suivi par le signal: 1 = émission de la station terrienne; 2 = réception dans le satellite; 3 = émission du satellite; 4 = réception dans la station terrienne.
- Les gains d'antenne $g_1(\theta)$ et $G_4(\theta)$ doivent, autant que possible, être calculés à l'aide de diagrammes du rayonnement mesuré des antennes des stations terriennes. Pour les calculs préliminaires, on peut toutefois utiliser le diagramme de rayonnement généralisé d'une antenne de station terrienne dont traite l'Avis 465.
- Pour des calculs très précis, on peut utiliser les angles topocentriques dans les expressions de g_1 et de G_4.
- La valeur des termes ΔG_2, E et e doit être calculée, si possible, d'après des diagrammes mesurés d'antenne de satellite. Ces termes peuvent être affectés par les variations de la géométrie des trajets en fonction du temps; toutefois, ces variations étant probablement assez faibles, on peut généralement les négliger.
- En l'absence de renseignements sur la polarisation des antennes de satellites, on adoptera pour les facteurs Y_U et Y_D une valeur de 0 dB. Le sujet de la discrimination due à la polarisation est examiné dans le Rapport 555.

2.2 *Cas II*

Lorsque la fréquence assignée à la liaison montante d'un réseau «utile» est la même que la fréquence assignée à la liaison descendante d'un réseau brouilleur, le rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse dans le réseau utile, sur la liaison montante, a pour expression approchée:

$$(C/I)'_U = P_t + G_1 - M_U + \Delta G'_2 - e' + Y' + 20 \log \theta' - 35{,}2 \quad \text{dB} \qquad (5)$$

où (en plus des définitions existantes):

$\Delta G'_2$: différence entre le gain de l'antenne de réception du satellite utile dans la direction de la station terrienne utile d'émission et le gain de cette même antenne dans la direction du satellite brouilleur:
$\Delta G'_2 = G_{2\,utile} - G_{2\,brouilleur}$ dB;

e' : p.i.r.e. de la porteuse brouilleuse du satellite dans la direction du satellite utile (dBW);

Y' : discrimination de polarisation minimale entre la porteuse du satellite brouilleur et l'antenne de réception du satellite utile (dB);

θ' : valeur minimale de l'espacement angulaire géocentrique des satellites, vu de la station terrienne utile (degrés).

Le calcul du brouillage d'une liaison montante à une liaison descendante «utile», c'est-à-dire le brouillage causé par un émetteur de station terrienne au récepteur de la station terrienne utile doit se faire sur la base des méthodes décrites dans les Rapports 448 et 388. Toutefois, il devrait être possible de réduire ce brouillage à une valeur négligeable, moyennant un choix judicieux des emplacements des stations terriennes.

2.3 *Rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse de la liaison*

Pour le cas I, la valeur finale du rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse de la liaison dépend des rapports correspondants liaison montante/liaison descendante. On peut utiliser la Fig. 3 pour déterminer un terme correctif ΔI (en dB) à partir du rapport de brouillage liaison montante/liaison descendante qu'on obtient en soustrayant le résultat de la formule (3) de celui de la formule (4). On utilise ce terme correctif pour établir la relation suivante:

$$(C/I)_{liaison} = (C/I)_U - \Delta I \quad \text{dB} \tag{6}$$

Pour le cas II, on utilisera simplement:

$$(C/I)'_{liaison} = (C/I)'_U \quad \text{dB} \tag{7}$$ *

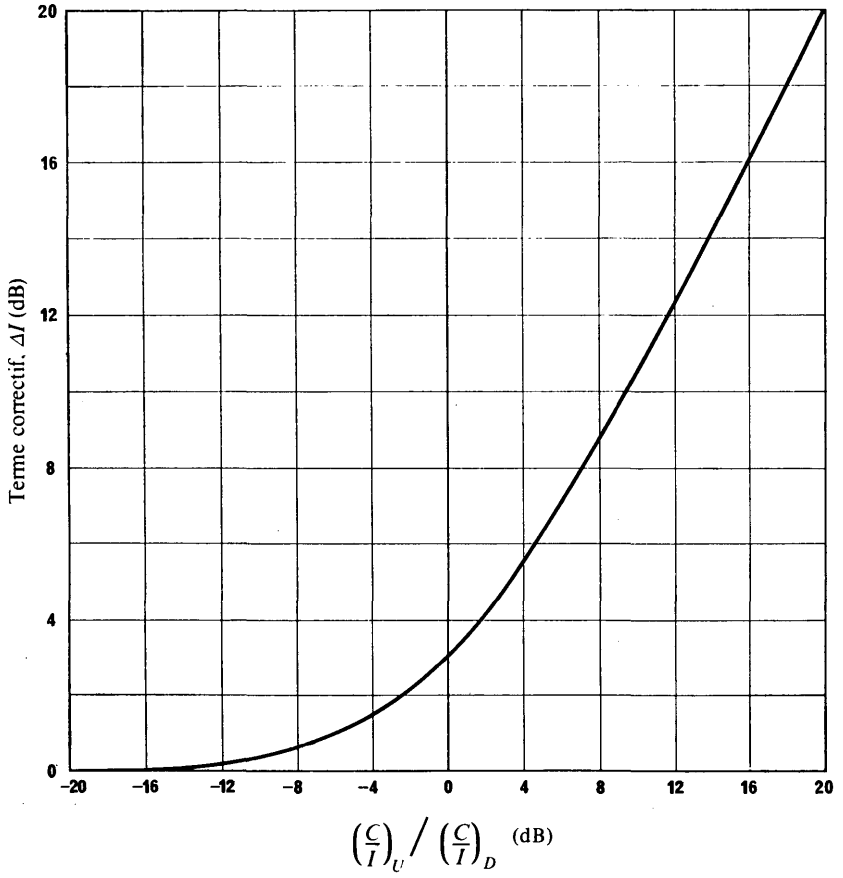


FIGURE 3 – *Variation du terme de correction ΔI en fonction du rapport entre les termes porteuse utile/porteuse brouilleuse correspondant aux liaisons montante et descendante*

$$\left(\frac{C}{I}\right)_U \Big/ \left(\frac{C}{I}\right)_D$$

3. Effets du brouillage

Le § 2 contient la formule qui permet de calculer le rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse. Les effets spécifiques sur le service assuré par le système dépendront de nombreux autres facteurs: 1) type du service, par exemple téléphonie, télévision, transmission de données, etc.; 2) procédé de modulation, par exemple modulation numérique, modulation de fréquence, modulation d'amplitude; 3) paramètres de modulation; 4) valeur requise du rapport porteuse utile/bruit thermique du système. Les possibilités d'interaction avec le signal brouilleur sont extrêmement nombreuses et variées. Il y a lieu de poursuivre l'étude de ce problème.

* Le brouillage entre stations terriennes devra être étudié séparément; les conditions de propagation à considérer sont en effet différentes, ainsi que les critères applicables.

Les types de transmission le plus couramment utilisés dans les systèmes du service fixe par satellite sont les suivants: *a)* téléphonie à modulation de fréquence; *b)* télévision à modulation de fréquence; *c)* transmission de porteuses à modulation numérique. Pour prévoir les performances globales de la liaison et établir les niveaux approximatifs du brouillage admissible, il faut connaître l'effet que produit le brouillage mutuel entre des signaux similaires et des signaux dissemblables dans la bande de base. Dans la présente Annexe, on se borne à présenter une méthode permettant de calculer les rapports porteuse utile/porteuse brouilleuse qui serviront de paramètre pour ces calculs.

4. Résumé

Une méthode progressive permettant de calculer les niveaux de brouillage entre deux systèmes à satellites, pour un ensemble particulier de paramètres, comprend les opérations successives suivantes:

4.1 donner la désignation «utile» à l'un des satellites et la désignation «brouilleur» à l'autre satellite;

4.2 choisir les paramètres permettant de résoudre les équations (3), (4) ou (5) pour l'une des sources possibles de brouillage et donner les désignations correspondantes, conformément au § 4.1;

4.3 résoudre, pour l'ensemble des paramètres choisis, les équations (3), (4) ou (5);

4.4 déterminer le rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse du réseau en utilisant les formules (6) ou (7), selon le cas;

4.5 en se servant de la valeur ainsi obtenue et des données relatives à la modulation et à l'écart de fréquence concernant les porteuses étudiées, déterminer, à l'aide du Rapport 388, la puissance de bruit dû au brouillage dans la porteuse utile;

4.6 répéter les opérations mentionnées ci-dessus, mais en intervertissant les désignations «utile» et «brouilleur» des satellites, s'il y a lieu;

4.7 répéter les opérations mentionnées ci-dessus pour toutes les combinaisons d'ondes porteuses et de stations terriennes qui pourraient être à l'origine de brouillages mutuels dans les deux réseaux.

Note. – Dans certains cas, une onde porteuse donnée pourra être brouillée par plusieurs autres ondes porteuses. En pareill cas, il semble que l'on soit en droit d'additionner en puissance les contributions de bruit dû aux brouillages.

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1966-69]: IV/348 (U.R.S.S.).

ANNEXE II

RELATION ENTRE RAPPORTS $\Delta T/T$ ET CRITÈRES DE BROUILLAGE UNIQUE

1. Introduction

Le Rapport 454 décrit la méthode de calcul permettant de déterminer la nécessité d'une coordination entre deux réseaux à satellites. Etant donné que les signaux brouilleurs y sont traités comme s'il s'agissait de bruit thermique, cette méthode peut être utilisée quelles que soient les caractéristiques de modulation et la capacité des porteuses transmises dans chaque réseau à satellites; en outre, il n'est pas nécessaire de connaître avec précision les fréquences utilisées. Ainsi, la méthode du Rapport 454 est approximative et devrait être appliquée avec certaines réserves: en effet, il ne faut pas exclure la nécessité d'une coordination entre deux réseaux à satellites dont les porteuses d'émission ont des critères applicables à un seul cas de brouillage qui ne seraient pas satisfaits si l'on procédait à des calculs détaillés. Ces critères pour un seul cas de brouillage représentent l'objectif final à atteindre pour maintenir le brouillage mutuel entre deux réseaux à satellites quelconques en deçà de valeurs déterminées à l'avance.

Le rapport $\Delta T/T$, qui correspond à un cas unique de brouillage déterminé, a été calculé pour plusieurs types de porteuses brouilleuses et utiles utilisées dans des réseaux à satellites géostationnaires. Si les paramètres de modulation des porteuses diffèrent de ceux que spécifie la référence [CCIR, 1978-82a], les valeurs de $\Delta T/T$ qui en résultent peuvent être différentes.

2. Relation entre ΔT/T et C/I

La méthode décrite dans le Rapport 454 est fondée sur le principe selon lequel la température de bruit du système brouillé subit une augmentation apparente sous l'effet des brouillages, les signaux brouilleurs étant traités comme un bruit thermique dont la densité spectrale de puissance serait égale à la densité spectrale maximale de puissance de ces signaux.

La densité spectrale maximale de puissance de la porteuse brouilleuse, I_0, peut être exprimée comme suit:

$$\frac{C}{I_0} = \frac{C}{k \times \Delta T} \tag{8}$$

où C/I_0 est le rapport porteuse/densité spectrale de brouillage, dans l'hypothèse où I_0 a été calculé comme si le brouillage pouvait être considéré comme un bruit thermique. L'augmentation apparente de la température de bruit du système subissant le brouillage est exprimée par ΔT, k étant la constante de Boltzmann (J/K).

Compte tenu du bruit total sur la liaison à satellite, on peut exprimer comme suit le rapport porteuse/densité spectrale de bruit de la porteuse utile:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{k\,T} \tag{9}$$

où T est la température de bruit équivalente sur la liaison à satellite de la porteuse subissant le brouillage.

La combinaison des formules (8) et (9) donne l'expression suivante:

$$10 \log \frac{\Delta T}{T} = (C/N_0) - (C/I_0) \tag{10}$$

dans laquelle les densités porteuse/bruit et porteuse/brouillage sont exprimées en dBHz.

Il convient de noter que I_0 correspond aux valeurs de densité maximale de puissance notifiées conformément aux Appendices 3 et 4 du Règlement des radiocommunications et utilisées dans les calculs effectués en application de l'Appendice 29 du même Règlement et au Rapport 454.

3. Protection de porteuses MRF-MF

Dans le document [CCIR, 1978-82a], les valeurs de $\Delta T/T$ ont été déterminées pour un grand nombre de porteuses brouilleuses de téléphone MRF-MF sur la base d'un brouillage unique de 600 pW0p et d'un bruit du système de 7000 pW0p (par exemple, bruit à l'exclusion de tout brouillage). Les valeurs requises pour le rapport porteuse/brouillage filtré (C/I_B) qui correspondent à un niveau de bruit de brouillage démodulé de 600 pW0p dans le canal supérieur de la porteuse utile ont été calculées à l'aide du modèle mathématique de la référence [Pontano et autres, 1973]. On n'a pas tenu compte de la séparation en fréquence pour chacune des paires de porteuses du Tableau I.

Le Tableau I montre les valeurs de $\Delta T/T$ qui en résultent pour plusieurs paires de porteuses brouilleuses, y compris les porteuses TV qui sont également examinées plus en détail dans le document [CCIR, 1978-82a]. On a étudié ici le cas d'une porteuse de télévision avec une excursion de crête de 7,5 MHz, modulée par un signal de mesure à salve de fréquences et un signal de balayage avec excursion crête-à-crête de 1 MHz.

TABLEAU I – *Rapports $\Delta T/T$ correspondant à un brouillage de 600 pW0p*

Porteuse brouilleuse (voie/MHz)	Porteuse utile (voie/MHz)	$\Delta T/T$ (%)
24/2,5	12/1,25	11,4
972/36	12/1,25	8,5
972/36	972/36	14,4
TV	12/1,25	8,5

La valeur minimale de 8,5% a été trouvée pour le cas le plus défavorable parmi ceux analysés dans le document [CCIR, 1978-82a].

Lorsque le brouillage de la porteuse MRF-MF est causé par une porteuse AMRT, le rapport $\Delta T/T$ correspondant à un brouillage de 600 pW0p aura, ici encore, une valeur minimale de 8,5% puisque les spectres des porteuses AMRT sont en général relativement uniformes.

4. Protection de porteuses AMRT

Pour les porteuses AMRT codées par un signal de téléphonie MIC à 8 éléments binaires, l'Avis 523 recommande: que le niveau maximal de puissance brouilleuse dans l'un quelconque de ces systèmes de téléphonie MIC à 8 éléments binaires, dû à l'un quelconque des émetteurs d'un autre réseau du service fixe par satellite (moyenne calculée sur 10 min. quelconques), ne devrait pas dépasser, pendant plus de 20% d'un mois quelconque, 4% du niveau total de la puissance de bruit à l'entrée du démodulateur qui se traduirait par un taux d'erreur de 10^{-6} sur les éléments binaires.

On admet que le bruit interne du système est égal à 70% du bruit total du système, les 30% restants étant attribués au brouillage par le système de Terre et par le système à satellites.

Les résultats des calculs appropriés (voir le doc. [CCIR, 1978-82a]) sont présentés dans le Tableau II.

TABLEAU II – *Valeurs de $\Delta T/T$ pour les porteuses AMRT utiles*

Porteuses brouilleuses	432/17,5	96/7,5	TV/4(1)		AMRT/36		AMRT/2,5	
Porteuse AMRT utile (MHz)	36	2,5	36	2,5	36	2,5	36	2,5
$\Delta T/T$(%)	43	7,2	51	5,7	5,7	5,7	8,2	5,7

(1) Dispersion d'énergie crête-à-crête de 4 MHz prise comme hypothèse

5. Protection de porteuses SCPC-MF

Pour le brouillage à large bande tel que celui causé par les porteuses MRF-MF ou AMRT, le rapport $\Delta T/T$ correspondant au bruit de 600 pW0p (ou l'équivalent subjectif dans le cas d'une porteuse SCPC-MF avec compression-extension) sera égal à 8,5% pour les mêmes raisons que celles exposées au § 3.

Pour le brouillage causé par une dispersion d'énergie à balayage lent, il peut se produire un bruit impulsif dû aux effets de seuil MF, mais on ne dispose pas de résultats de mesure susceptibles de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Il faut donc considérer la limite du rapport $\Delta T/T$ pour ce cas comme inconnue, mais avec un seuil supérieur de 8,5%.

Pour le brouillage causé par d'autres porteuses SCPC-MF, dans l'hypothèse où on utilise la commutation des porteuses commandée par la voix et où la valeur efficace d'excursion de fréquence est de 3,4 kHz, on a trouvé, dans le document [CCIR, 1978-82a], que le rapport $\Delta T/T$ correspondant à un bruit de brouillage équivalent de 600 pW0p était d'environ 3%.

6. Protection de porteuses SCPC-MDP

Lorsque le signal brouilleur peut être considéré comme un bruit thermique, on peut à nouveau appliquer le même critère de brouillage par source unique et tirer les mêmes conclusions que dans le cas de la porteuse SCPC-MF. En conséquence, le rapport $\Delta T/T$ requis aura la même valeur que le pourcentage spécifié pour le cas d'un brouillage par source unique.

On peut maintenant analyser un autre type de brouillage, lorsque le signal brouilleur est une porteuse modulée en fréquence à balayage lent, semblable à une porteuse de télévision MF modulée par le seul signal de dispersion d'énergie.

Des mesures de laboratoire ont été effectuées [CCIR, 1979-82b] et les résultats sont indiqués dans l'Annexe 5.2.9.5.2 du Rapport de la RSP (page 5216 de la version française). Conformément à cette Annexe, les niveaux du nombre «N de sources identiques de brouillage à ondes entretenues ayant toutes une énergie identique de dispersion lente triangulaire, mais sans corrélation» ont été réglés de manière à respecter le critère de 10% fixé dans l'Avis 523 (pour les porteuses numériques MIC à 8 éléments binaires). Si l'on prend comme exemple les données fournies par ces mesures, les valeurs obtenues pour le rapport requis $\Delta T/T$ pour la protection de trois porteuses SCPC-MDP différentes, avec des largeurs de bande attribuées de 22,5 kHz, 30 kHz et 45 kHz, contre les porteuses brouilleuses de télévision MF à balayage lent avec une excursion crête-à-crête du signal de dispersion d'énergie de 1 MHz, avoisineraient 1%.

7. Résumé et conclusions

Les résultats obtenus pour le rapport $\Delta T/T$ qui correspond aux objectifs spécifiques pour le cas unique de brouillage lorsque le brouillage se produit entre chaque paire de porteuses à bande large ont été présentés dans cette Annexe.

Pour le brouillage causé aux porteuses MRF-MF, la valeur la plus faible du rapport T/T est d'environ 8,5%. Lorsque le signal utile est une porteuse AMRT, cette valeur sera d'environ de 6% dans de mombreux cas.

Les valeurs de $\Delta T/T$ obtenues pour le brouillage causé à des porteuses à une seule voie par porteuse sont résumées dans le Tableau III. Pour le brouillage causé par des porteuses MRF-MF, TV-MF et AMRT, qui peut être examiné avec la densité spectrale de puissance uniforme dans la largeur de bande de la porteuse SCPC, la valeur de $\Delta T/T$ correspondant à un critère donné de cas unique de brouillage sera identique à la valeur en pourcentage de ce critère.

En résumé, si le signal brouilleur est un signal MRF-MF, un signal modulé TV-MF ou une porteuse AMRT, la valeur de 4% pourra être choisie pour le seuil de décision du Rapport 454. Pour le brouillage entre deux porteuses SCPC-MF, la valeur requise pour le rapport $\Delta T/T$ peut être voisine du critère de 4%.

Toutefois, dans certains cas, le critère de 4% adopté par la CAMR-79 ne sera peut-être pas entièrement satisfaisant pour assurer la protection des porteuses SCPC-MDP contre les porteuses de télévision MF.

TABLEAU III – *Résumé des résultats obtenus pour le rapport $\Delta T/T$ dans les cas de brouillages causés à des porteuses à une seule voie par porteuse*

De / A	Brouillage analogue à un bruit thermique (MRF, TV, AMRT)	TV-MF à étalement lent	MF une seule voie par porteuse
SCPC-MF	$\Delta T/T = 8{,}5\%$	pas de mesure disponible	$\Delta T/T$ voisin de 3%
SCPC-MDP	$\Delta T/T = 6\%$	$\Delta T/T$ avoisinera 1%	cas non analysé

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PONTANO, P., FUENZALIDA, J. et CHITRE, N. [juin 1973] Interference into angle-modulated systems carrying multi-channel telephony signals. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. COM-21, **6**, 714-727.

Documents du CCIR

[1978-82]: **a.** 4/128 (Brésil); **b.** 4/156 (INTELSAT).

BIBLIOGRAPHIE

INTELSAT [1978] Brouillage entre porteuses de télévision à balayage lent et porteuses SCPC. Doc. P/293. Réunion spéciale préparatoire (CAMR-79). Genève.

RAPPORT 555-2

DISCRIMINATION PAR L'EMPLOI DE POLARISATIONS ORTHOGONALES CIRCULAIRES OU RECTILIGNES

(Programmes d'études 1B/4 et 1C/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Le recours à la polarisation orthogonale peut offrir un moyen efficace d'accroître la capacité de l'orbite des satellites géostationnaires.

Les applications possibles des polarisations orthogonales sont les suivantes:

- réutilisation des fréquences dans les faisceaux principaux des antennes de satellite ou de station terrienne;
- emploi pour des satellites adjacents afin de réduire l'espacement entre les satellites;
- emploi dans les faisceaux étroits – voisins ou se chevauchant – des satellites, afin de réduire les brouillages;
- réduction du brouillage causé à des liaisons à faible puissance par des liaisons à plus grande puissance passant par le même satellite.

On doit à cet égard tenir compte de divers facteurs: discrimination par polarisations croisées que l'on peut obtenir dans différentes parties des faisceaux d'antenne et pour différentes fréquences dans la bande de fonctionnement, caractéristiques des polarisateurs, effets de dépolarisation dans l'atmosphère et dans l'ionosphère, stabilité d'orientation du satellite et mise en œuvre de la poursuite et de la correction de polarisation.

2. Facteurs exerçant une influence sur la discrimination de polarisation

2.1 *Système d'antennes des stations terriennes*

2.1.1 *Antennes des stations terriennes*

Lorsque les fréquences sont réutilisées par la même station spatiale, le centre du faisceau principal est la région la plus importante.

Dans la direction du pointage optique, la discrimination de polarisation dépend surtout des organes d'alimentation (transducteurs orthomodes, polariseurs, etc.). Dans le faisceau principal, mais en dehors du pointage optique, la discrimination dépend avant tout de l'élément rayonnant principal (par exemple, le cornet d'alimentation), mais elle peut aussi dépendre de l'utilisation de réflecteurs en position décalée à illumination décentrée ou à source périscopique. Les performances des différents types d'antennes sont étudiées dans l'Annexe I au présent Rapport, ainsi que les résultats des mesures effectuées sur un certain nombre d'antennes.

2.1.2 *Polariseurs dans les stations terriennes*

Dans les systèmes à polarisation circulaire, on se sert de polariseurs pour la conversion entre polarisation rectiligne et polarisation circulaire. Dans les systèmes à polarisation rectiligne, on peut utiliser des polariseurs rotatifs pour aligner la polarisation du rayonnement de la station terrienne sur celle de l'onde reçue. Dans les deux cas, on peut utiliser des polariseurs réglables pour compenser les effets de dépolarisation.

Si l'on utilise un polariseur commun pour l'émission et la réception, il doit couvrir à la fois les fréquences de la liaison montante et celles de la liaison descendante, ce qui peut obliger à adopter des caractéristiques à large bande. De plus, ce polariseur devra permettre l'émission d'une puissance élevée en hyperfréquences, ainsi que la réception avec une faible température de bruit. La Fig. 1a indique, en fonction de la fréquence, la discrimination de polarisation obtenue avec un polariseur de station terrienne spécialement conçu pour la réutilisation des fréquences, et fonctionnant dans les bandes 6/4 GHz. La contribution à la température de bruit est de l'ordre de 2 K à 4 GHz.

Un autre procédé consiste à utiliser des systèmes d'alimentation de telle manière que la bande des fréquences d'émission soit séparée de celle des fréquences de réception; on met alors en œuvre des polariseurs à bande étroite et des jonctions «orthomodes» ayant une meilleure discrimination de polarisation.

La Fig. 1b montre le taux d'ellipticité mesuré de deux polariseurs à bande étroite conçus pour une antenne de station terrienne à polarisation circulaire.

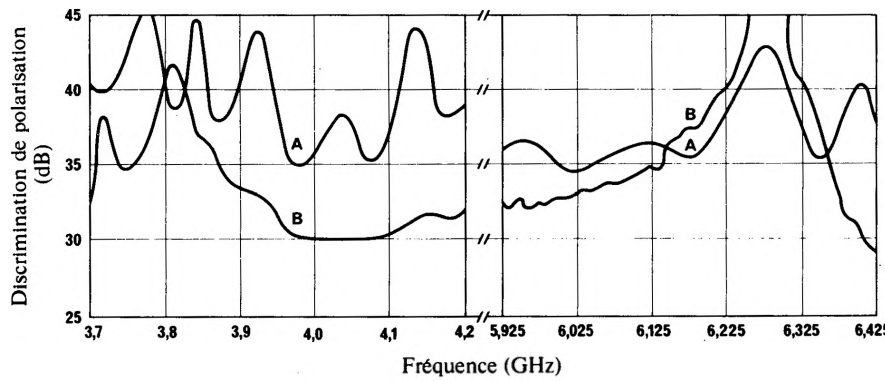


FIGURE 1a – *Caractéristiques des polariseurs pour une station terrienne*

A : polarisation circulaire
B : polarisation rectiligne

2.1.3 *Performances des stations terriennes*

On étudie dans ce paragraphe les caractéristiques d'ensemble d'un système d'antenne composé d'une antenne et d'un polariseur.

Dans le faisceau principal, jusqu'à la région à -1 dB, des antennes typiques de station terrienne peuvent fournir plus de 30 dB de discrimination en polarisation circulaire et plus de 35 dB en polarisation rectiligne.

Bien en dehors du faisceau principal, on ne peut pas s'attendre généralement à une grande discrimination de polarisation [Haidle et Fitzgerrell, 1977].

2.1.4 *Mesure de la discrimination de polarisation des antennes des stations terriennes*

Les difficultés pratiques que l'on rencontre pour mesurer les rapports de discrimination des différents éléments sont considérables, et il faudra encore poursuivre les études théoriques et les expériences avant que l'on puisse recommander une méthode normalisée de mesure des caractéristiques de discrimination de polarisation que possède une antenne de station terrienne.

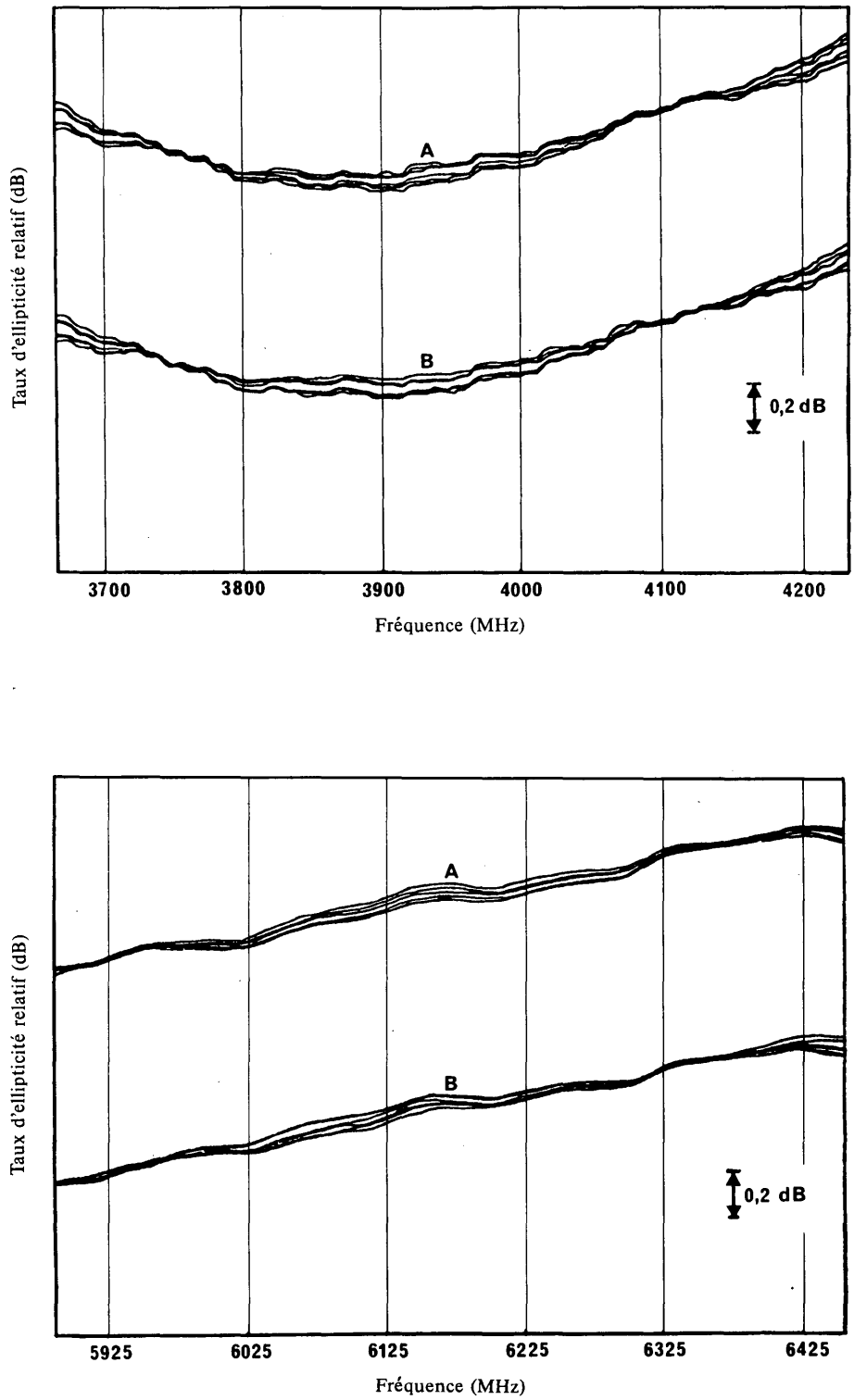


FIGURE 1b – *Caractéristiques des polariseurs dans les bandes des 4 et 6 GHz*

A : polarisation circulaire lévogyre
B : polarisation circulaire dextrogyre

On peut diviser les méthodes de mesure précises en deux catégories: la méthode utilisant les signaux émis par un satellite et la méthode utilisant le pointage optique.

La méthode utilisant les signaux émis par un satellite peut être subdivisée en méthode directe de découplage et méthode de l'antenne de référence. La méthode directe de découplage mesure la discrimination de polarisation d'une antenne de station terrienne en déterminant directement le rapport entre la puissance reçue à l'entrée contrapolaire et à l'entrée copolaire. La méthode de l'antenne de référence utilise une antenne de référence de polarisation pour éliminer la dépolarisation due au satellite des données mesurées pour l'antenne étudiée.

Les critères d'emploi de la méthode d'isolement direct et de la méthode de l'antenne de référence sont indiqués dans l'Annexe II qui contient également certaines considérations relatives à la méthode de l'antenne de référence.

Lorsqu'on recourt à la méthode du pointage optique, les données obtenues présentent un degré élevé de reproductibilité et diverses techniques de mesures telles que la technique de balayage des fréquences peuvent être appliquées.

Pour la polarisation quasi-circulaire (c'est-à-dire un taux d'ellipticité $TE \leqslant 3$ dB), la valeur du taux d'ellipticité (TE) en tension (en dB) peut être convertie en discrimination de polarisation (XPD) de la façon suivante:

$$XPD \text{ (en dB)} = 24{,}8 - 20 \log TE \text{ (en dB)}, \text{ d'où l'on tire:}$$

$$TE \text{ (en dB)} = 17{,}37 \left[10^{\frac{-XPD \text{ (en dB)}}{20}} \right]$$

2.2 *Systèmes d'antenne des satellites*

2.2.1 *Antennes des satellites*

Pour les antennes de satellite, la région qui présente de l'intérêt coïncide avec la couverture du faisceau de rayonnement et s'étend au moins jusqu'au contour à -3 dB. Des mesures typiques dont les résultats sont présentés dans l'Annexe I montrent que, dans cette région, une antenne de satellite munie d'un cornet, dont le faisceau a une symétrie de révolution presque parfaite autour de l'axe focal, permet d'obtenir une discrimination de 40 dB pour la polarisation circulaire et la polarisation rectiligne. Lorsque l'antenne de satellite présente un blocage d'ouverture, les valeurs de discrimination peuvent être de 35 dB en polarisation rectiligne et de 30 dB en polarisation circulaire, à l'intérieur de la même région. Il est possible de résoudre le problème du blocage d'ouverture en utilisant des réflecteurs en position décalée. Un type courant de réflecteur parabolique double à polarisation rectiligne, avec faisceau elliptique (rapport des axes: 2/1), peut donner une discrimination comprise entre 30 et 35 dB dans la région à -3 dB. On peut avoir à utiliser des réflecteurs spéciaux à grille pour maintenir des valeurs élevées de discrimination de polarisation rectiligne.

2.2.2 *Polariseurs des satellites*

Dans le cas des satellites, les polariseurs nécessaires à la production de la polarisation circulaire traitent séparément les bandes d'émission et de réception et peuvent être conçus pour assurer une très bonne discrimination de polarisation. Par exemple, on a réalisé des polariseurs donnant une discrimination de polarisation de 40 dB, et cela dans les bandes des 4 et des 6 GHz, pour toute bande de 500 MHz de largeur.

2.3 *Trajet de propagation*

2.3.1 *Rotation de Faraday*

La rotation de Faraday a une influence importante dans le cas de la polarisation rectiligne, mais son effet est négligeable sur la polarisation circulaire.

La variation angulaire du vecteur champ électrique due à la rotation de Faraday dépend de la direction de propagation par rapport au champ magnétique terrestre, de l'état de l'ionosphère traversée par l'onde et de l'intensité du champ magnétique terrestre. L'ampleur de cette rotation est aussi inversement proportionnelle au carré de la fréquence. L'état de l'ionosphère dépend de nombreux facteurs, dont la saison, l'heure du jour et l'activité solaire. La rotation de Faraday peut atteindre occasionnellement une valeur de crête de 9° à 4 GHz, 4° à 6 GHz et 1° à 12 GHz. Cette valeur de crête dépend cependant des emplacements géographiques de la station terrienne et du satellite et peut souvent être négligeable pour les fréquences supérieures à 10 GHz. Si la rotation de Faraday est importante à la fréquence d'exploitation, il faut prévoir une rotation différentielle des plans de polarisation à la station terrienne, étant donné que le sens de rotation de l'onde émise est inverse de celui de l'onde reçue, vue dans le sens de la propagation.

2.3.2 *Précipitations*

La pluie et la neige ont pour effet de dégrader considérablement la discrimination de polarisation. Les précipitations peuvent introduire des différences d'affaiblissement et de phase entre les composantes à polarisations rectilignes orthogonales du signal; il en résulte une dégradation de la discrimination entre signaux à polarisation rectiligne ou circulaire. L'effet de la pluie sur la polarisation rectiligne dépend des angles d'orientation des gouttes de pluie par rapport au plan de polarisation; l'effet est le même qu'en polarisation circulaire pour un angle de 45°, et moindre pour d'autres angles. L'effet de dépolarisation prédominant est causé par la différence de déphasage; toutefois, au-dessus de de 10 GHz, la différence d'affaiblissement commence à prendre également de l'importance. Il est possible de corriger, dans une antenne de station terrienne, les effets de dépolarisation dus à la pluie; néanmoins, la correction des effets de l'affaiblissement risque d'entraîner une diminution du rapport G/T, par augmentation des pertes dans les guides d'ondes et les systèmes d'alimentation.

Des travaux expérimentaux et théoriques ont montré qu'il existe une bonne corrélation statistique entre l'affaiblissement copolaire et la discrimination entre signaux orthogonaux pendant les chutes de pluie. Une relation empirique a été trouvée: elle s'ajuste assez bien aux données mesurées et peut être utilisée pour prévoir la discrimination de contrapolarisation en un emplacement donné, à partir des statistiques d'affaiblissement copolaire à des fréquences comprises entre 8 et 40 GHz. Cependant, bien que la dépolarisation soit parfois associée à l'affaiblissement par les précipitations, elle n'est pas toujours associée à un affaiblissement important et a été attribuée à la présence de nuages de glace le long du trajet.

On trouvera dans le Rapport 722 (Volume V) un résumé plus complet des mesures et de la théorie.

3. Contrapolarisation dans les systèmes à satellites

3.1 *Position et attitude des satellites*

La direction du plan de polarisation d'une antenne de satellite, vue des antennes de stations terriennes, varie en fonction des variables suivantes: position du satellite par rapport à l'emplacement de la station terrienne et attitude du satellite. Ces variations peuvent être maintenues à de faibles valeurs si l'on utilise les techniques actuelles de commande d'orientation et de maintien en position du satellite.

3.2 *Poursuite de polarisation*

Dans le cas des stations terriennes qui émettent un rayonnement à polarisation rectiligne, il peut être nécessaire d'effectuer une poursuite de polarisation ou un réglage périodique de l'angle de polarisation, pour compenser les effets de la rotation de Faraday et des paramètres géométriques examinés au § 3.1. On peut être amené également à régler l'angle de polarisation, lorsqu'on fait la commutation sur un autre satellite ou sur un autre faisceau du même satellite. Par exemple, si le plan de polarisation présente des défauts d'alignement de 1° et 6°, il en résultera respectivement une discrimination de polarisation de 35 et 20 dB. On peut réaliser la poursuite de polarisation en faisant tourner l'ensemble du système d'alimentation, ou certains éléments seulement tels qu'un transducteur «orthomode» ou un polariseur approprié.

3.3 *Correction de polarisation*

Comme décrit précédemment, la dégradation de la discrimination de polarisation due au trajet de propagation est causée principalement par le déphasage et l'affaiblissement différentiels introduite par les précipitations.

Dans les systèmes de télécommunication par satellite, l'effet de dépolarisation peut se produire à la fois sur la liaison montante et sur la liaison descendante. Cet effet dépend des conditions climatiques. Lorsque les performances d'un système à satellite à double polarisation se dégradent d'une manière excessive, une correction de polarisation peut devenir nécessaire sur la liaison montante, sur la liaison descendante ou sur les deux liaisons.

3.3.1 *Circuits de correction de polarisation*

La correction de polarisation peut être effectuée par la correction des effets du déphasage et de l'affaiblissement différentiels à la station d'émission et/ou à la station de réception. On peut classer les circuits de correction de polarisation dans l'une des trois catégories suivantes:

a) les circuits destinés à corriger les effets du déphasage et de l'affaiblissement différentiels sont insérés dans des portions de guide d'ondes des voies d'émission et de réception de l'antenne de la station terrienne;

b) les circuits destinés à corriger les effets du déphasage différentiel sont insérés dans des portions de guide d'ondes des voies d'émission et de réception de l'antenne de la station terrienne et les circuits destinés à corriger l'effet de l'affaiblissement différentiel le sont en aval d'un amplificateur à faible bruit et en amont d'un émetteur de grande puissance;

c) les circuits destinés à corriger les effets du déphasage et de l'affaiblissement différentiels sont insérés sous forme de couplage entre les deux alimentations à polarisations orthogonales en aval des amplificateurs à faible bruit et en amont des émetteurs de grande puissance.

Dans la pratique, on peut employer des configurations dans lesquelles des catégories différentes sont utilisées sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

3.3.2 *Circuits de correction de l'effet du déphasage différentiel*

La fonction du déphaseur différentiel dans les configurations *a)* et *b)* est telle qu'un déphasage réglable de 0 à 180° peut être obtenu dans un sens ou dans l'autre sur l'ellipse de polarisation. En général, ce déphaseur différentiel réglable peut se composer de deux polariseurs rotatifs connectés en tandem et comprendre plusieurs combinaisons de déphaseurs élémentaires de 90° et de 180°.

3.3.3 *Circuits de correction de l'effet de l'affaiblissement différentiel*

Le circuit de correction de l'effet de l'affaiblissement différentiel sert à supprimer une dépolarisation résiduelle qui reste non compensée après correction de l'effet du déphasage différentiel. La fonction du circuit de correction doit être tel que l'affaiblissement variable puisse être obtenu dans un sens ou dans l'autre sur l'ellipse de polarisation. Dans la pratique, on peut utiliser des circuits de couplage composés de diviseurs, de combineurs, d'atténuateurs et de déphaseurs réglables.

3.3.4 *Méthodes de commande des circuits de correction*

On peut envisager deux méthodes pour la commande des circuits de correction sur la liaison montante. La première est une méthode de prévision et l'autre une méthode utilisant un ou plusieurs signaux pilotes. Dans le premier cas, les signaux de commande destinés aux circuits de correction de la liaison montante sont dérivés du déphasage et de l'affaiblissement différentiels grâce aux informations fournies par la liaison descendante. Les caractéristiques de qualité obtenues avec les circuits de correction dépendent de l'exactitude de la prévision. C'est pourquoi, avant d'appliquer cette méthode à un cas pratique, il faut disposer de suffisamment de données pour prouver la corrélation entre les dégradations de polarisation respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante. Dans le deuxième cas, les circuits de correction de la liaison montante peuvent être commandés par le signal d'erreur provenant de la différence de phase et du rapport d'amplitude d'une composante contrapolaire par rapport à une composante copolaire sur la liaison montante; on utilise pour cela des signaux pilotes provenant de la station terrienne et retransmis par le satellite. Cette seconde méthode permet de réaliser une correction hautement fiable si on la compare aux résultats de la méthode de prévision car on peut obtenir des informations plus précises sur les signaux d'erreur et car la station terrienne d'émission peut aussi contrôler les conditions de polarisation des porteuses émises. En règle générale, la méthode avec pilotes est donc à recommander.

3.3.5 *Résultats expérimentaux*

Des mesures ont été effectuées à l'aide du satellite Intelsat IV-A (F-3). Ces mesures étaient fondées sur l'utilisation de deux combinaisons différentes des polariseurs rotatifs servant à la correction de l'effet du déphasage différentiel. Les résultats sont indiqués à la Fig. 2. Il apparaît que la complexité accrue qui suppose la correction de l'affaiblissement différentiel ne se traduirait que par une légère amélioration.

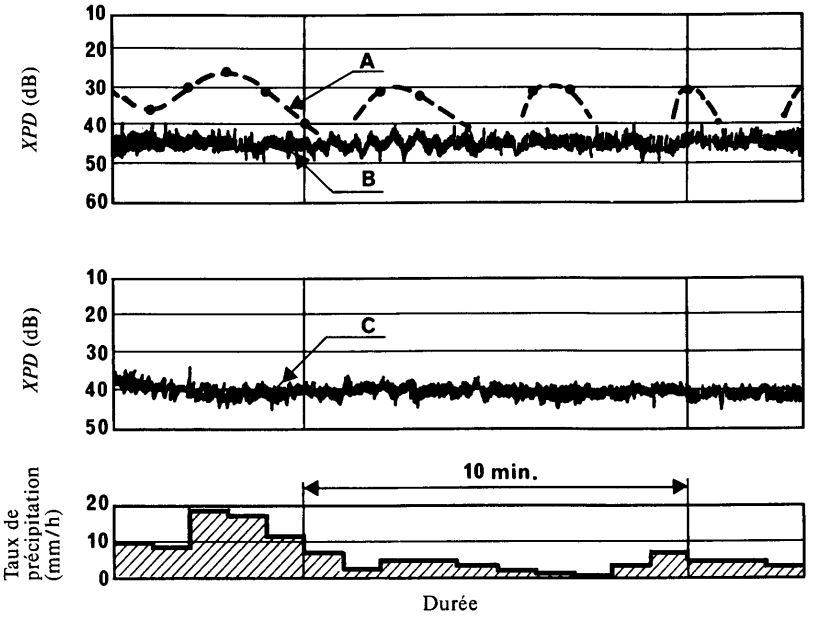
3.4 *Comparaison entre les polarisations rectiligne et circulaire*

Il est utile de récapituler les considérations dont il convient de tenir compte lorsqu'on choisit entre la polarisation circulaire et la polarisation rectiligne dans les systèmes à satellites:

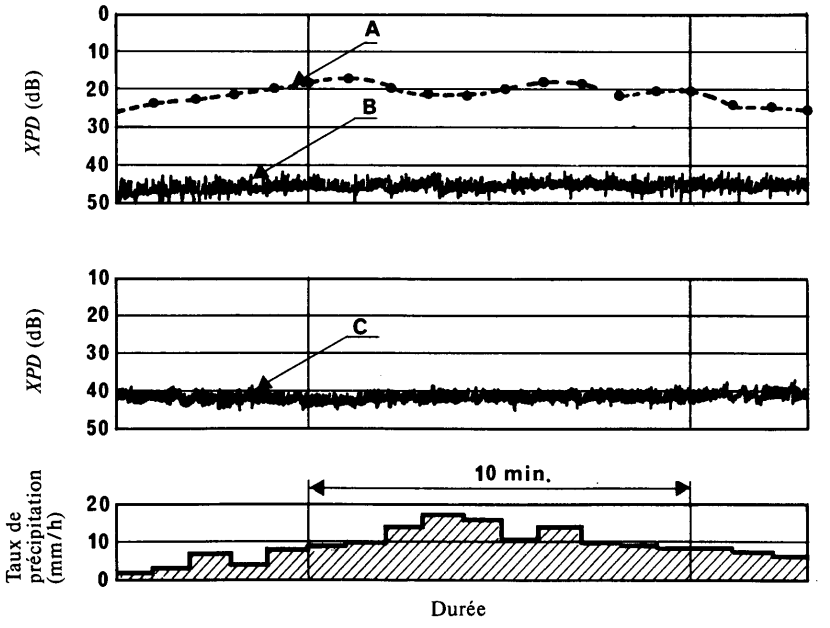
- la polarisation rectiligne demande qu'un alignement adéquat soit maintenu entre les directions de polarisation des antennes du satellite et de la station terrienne;
- pour la polarisation rectiligne à des fréquences inférieures à 10 GHz, la rotation de Faraday peut nécessiter une poursuite de polarisation dans la station terrienne;
- l'angle de polarisation d'une antenne à polarisation rectiligne peut varier dans la largeur de bande nominale de cette antenne;
- la performance des polariseurs, nécessaires dans les systèmes à polarisation circulaire et qui peuvent aussi être utilisés dans les systèmes à polarisation rectiligne, peut varier avec la fréquence;
- des systèmes à polarisation rectiligne correctement réglés donnent de meilleurs résultats, en cas de pluie, que les systèmes à polarisation circulaire.

4. Conclusions

Lorsqu'on considère la discrimination de polarisation comme moyen permettant d'améliorer l'utilisation du spectre des fréquences et de l'orbite des satellites géostationnaires, il faut tenir compte de plusieurs facteurs, par exemple le choix entre la réutilisation de la fréquence par le même satellite ou par des satellites adjacents, les diagrammes d'antenne à polarisations croisées en dehors du faisceau de rayonnement et dans l'axe de ce faisceau, ainsi que des questions d'exploitation, telles que la poursuite et la correction de polarisation. Il convient de poursuivre l'étude de méthodes permettant de réduire l'importance de la composante de polarisation croisée, que ce soit en polarisation circulaire ou en polarisation rectiligne; comme exemple de ces méthodes, on peut citer l'utilisation de signaux pilotes pour adapter l'antenne à la polarisation.



a) pol. 90° + pol. 180°



b) pol. 90° + pol. 90°

FIGURE 2 – *Exemple caractéristique de données mesurées par temps de pluie*

XPD: discrimination de polarisation contrapolaire

A: *XPD* non corrigée f_1 = 3940 MHz
B: *XPD* corrigée f_1 = 3940 MHz
C: *XPD* corrigée f_2 = 3780 MHz

Les administrations sont invitées à présenter de nouveaux résultats d'études concernant les valeurs mesurées de la discrimination de polarisation croisée dans le faisceau principal d'un système d'antenne de satellite ou de station terrienne, et dans les lobes latéraux éloignés des systèmes d'antenne de station terrienne. De préférence, il conviendrait de présenter les résultats relatifs aux valeurs de crête dans les lobes latéraux sous la forme d'une distribution statistique, comme dans le Rapport 391. Il conviendrait de donner également des descriptions des systèmes d'adaptation pour la correction de polarisation, et également des résultats de mesure concernant la discrimination de polarisation réalisée sur des trajets de transmission par satellite, respectivement avec et sans des systèmes de cette nature.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HAIDLE, L. L. et FITZGERRELL, R. G. [mai 1977] Hemispherical power gain pattern measurements at 7.5 GHz. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-25, 3, 373-376.

ANNEXE I

DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT CONTRAPOLAIRES DES ANTENNES

1. Considérations d'ordre théorique

Le diagramme de rayonnement contrapolaire d'une antenne à réflecteur dépend du cornet d'alimentation et de la structure du réflecteur.

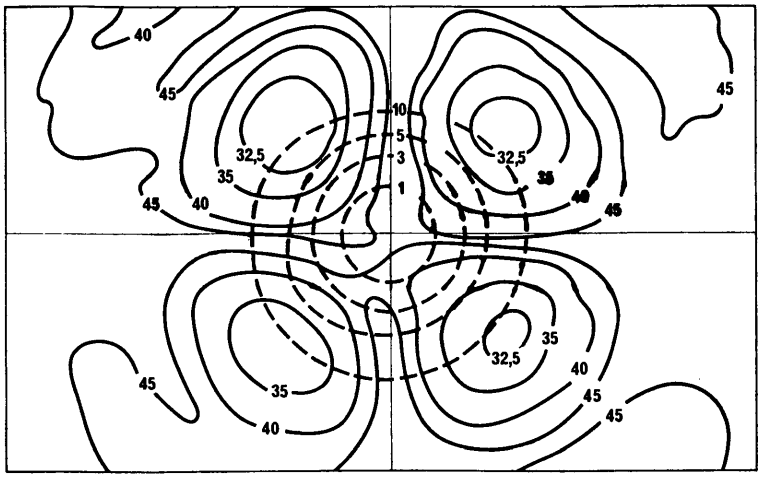
Le diagramme contrapolaire d'un cornet conique, Fig. 3a), fait apparaître une structure à quatre lobes qui est caractéristique des cornets droits et des réflecteurs symétriques, avec un zéro (grande discrimination de polarisation) sur l'axe. Les crêtes du diagramme contrapolaire apparaissent sur le contour à -10 dB du lobe principal copolaire, nettement à l'extérieur de la gamme de poursuite normale d'une antenne de station terrienne et nettement à l'extérieur de la zone de couverture d'une antenne de satellite. La discrimination de contrapolarisation dans le faisceau principal d'un cornet monomode à paroi lisse est trop petite pour que l'on utilise pareil cornet dans un système à polarisation double. On peut obtenir des performances améliorées de deux façons: soit en produisant intentionnellement des modes d'ordre élevé aux points de discontinuité à l'intérieur du cornet à paroi lisse soit en utilisant un cornet cannelé pour produire des modes hybrides contenant moins d'énergie contrapolaire.

La qualité de fonctionnement du cornet d'alimentation est le facteur prédominant qui détermine les qualités de polarisation d'une antenne à réflecteur symétrique. La courbure du réflecteur ou les réflecteurs eux-mêmes devraient contribuer très peu à la formation des lobes contrapolaires (de l'ordre de 50 dB au-dessous de la crête copolaire). Il est possible que les supports du système d'alimentation ou du réflecteur secondaire aient pour effet d'accroître le rayonnement contrapolaire dans certaines parties du faisceau, mais ces effets sont difficiles à prévoir.

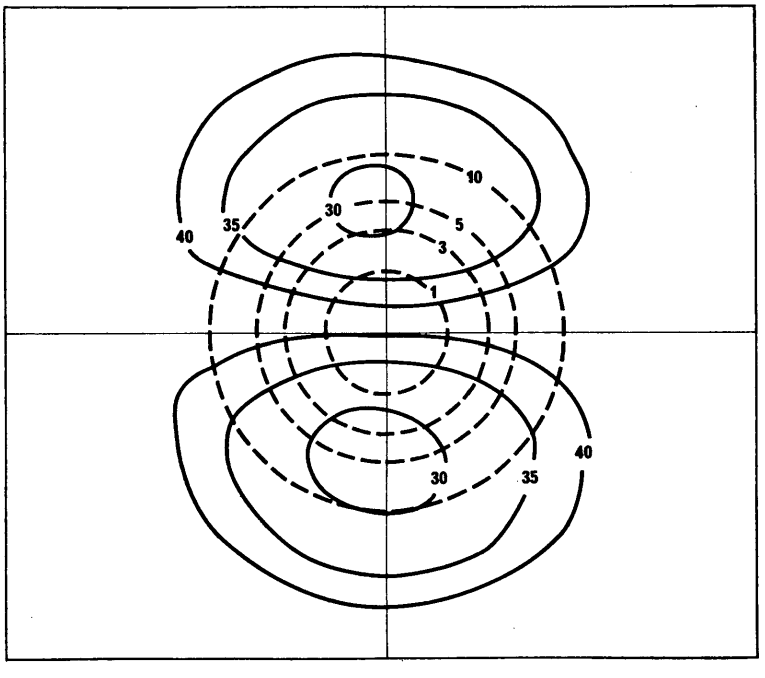
La Fig. 3b) montre que le diagramme de rayonnement contrapolaire d'un cornet réflecteur est fondamentalement différent de celui d'un cornet symétrique. Les réflecteurs incurvés, à source d'illumination décalée tels que ceux des cornets réflecteurs, donnent naissance typiquement à deux crêtes de contrapolarisation, de chaque côté du plan de symétrie du réflecteur, avec des maxima assez voisins de la crête de copolarisation [Gans et Semplak, 1975]. Dans la pratique, cet inconvénient intrinsèque des réflecteurs décalés peut être éliminé en grande partie, de deux manières: soit en produisant un mode élevé asymétrique approprié dans le cornet d'alimentation [Rudge et Adatia, 1975] soit en mettant en œuvre un réflecteur secondaire incurvé convenable, à illumination décalée. Les Fig. 4a) et 4b) montrent la contrapolarisation mesurée d'antennes récemment mises au point, à réflecteur double et alimentation décalée, avec des faisceaux dont les axes sont presque symétriques [Mizugutch et autres, 1976]. Il se produit une suppression quasi parfaite de la contrapolarisation due aux réflecteurs asymétriques, de sorte que l'on n'observe que la contrapolarisation résiduelle du cornet d'alimentation.

Les réflecteurs incurvés décalés qui entrent dans la composition d'un système à source périscopique produisent des lobes contrapolaires semblables; toutefois, deux réflecteurs de ce type peuvent être disposés de telle façon que leurs effets s'annulent mutuellement en grande partie; dans ces conditions, les lobes contrapolaires qui attaquent le réflecteur secondaire Cassegrain ont un niveau inférieur de plus de 30 à 35 dB à la crête de copolarisation [Gans, 1976].

Dans ce qui précède, on a supposé que la polarisation était rectiligne. Avec une polarisation circulaire, le comportement des cornets et réflecteurs symétriques à illumination décalée est fondamentalement différent. Avec des cornets et des réflecteurs symétriques, les quatre lobes de contrapolarisation (cas de la polarisation rectiligne) sont remplacés par un seul lobe à symétrie circulaire, de même intensité et situé à la même distance par rapport à la crête de copolarisation. Avec des cornets réflecteurs et des réflecteurs incurvés à illumination décalée, on n'obtient qu'un très faible niveau de contrapolarisation (moins de 50 dB au-dessous de la crête de copolarisation), mais la crête de copolarisation est déplacée latéralement d'une distance égale à une fraction de l'ouverture du faisceau; le sens de ce déplacement dépend du sens de la polarisation circulaire.



a) Cornet conique avec faisceau à symétrie sensiblement axiale
(Facteur de symétrie du faisceau ≈ 1,05)



b) Réflecteur en cornet conique avec faisceau à symétrie sensiblement axiale*
(Facteur de symétrie du faisceau ≈ 1,05)

FIGURE 3 – *Niveaux mesurés de polarisations croisées (polarisation rectiligne)*

Notes. — Ligne en trait plein, courbe du niveau de polarisations croisées rapporté au niveau de crête du faisceau principal pour la polarisation principale.

— Ligne en trait interrompu, courbe du niveau de la polarisation principale ou normale du faisceau principal.

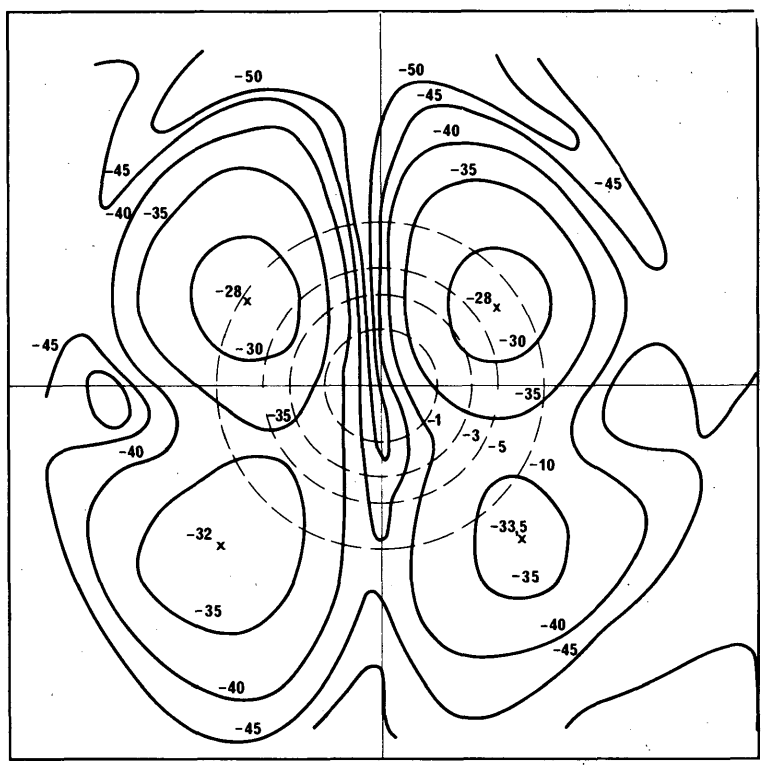
— Les chiffres portés dans les graphiques indiquent les niveaux relatifs en dB par rapport au niveau de crête du faisceau principal pour la polarisation principale.

— Le point central des graphiques représente le niveau de crête du faisceau principal pour la polarisation principale.

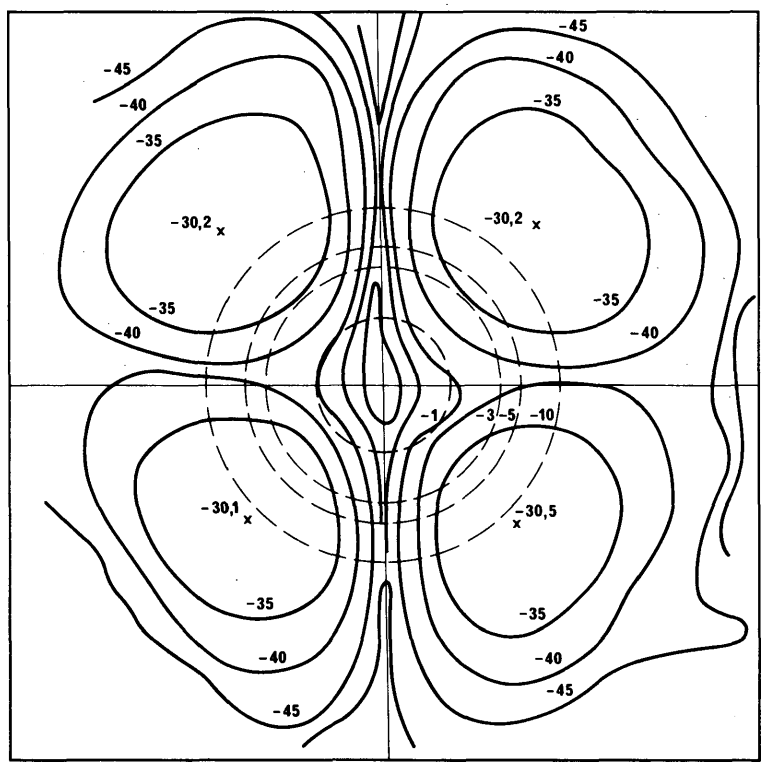
— Le plan du vecteur champ électrique pour la polarisation principale est orienté de haut en bas sur les graphiques, pour la polarisation rectiligne.

— L'axe du cornet de l'antenne à réflecteur en cornet est orienté de gauche à droite dans les graphiques, le sommet du cornet étant sur la gauche.

* Plan de polarisation perpendiculaire à l'axe du cornet.



a) Antenne Grégory à illumination décalée avec cornet conique comportant un diélectrique



b) Antenne Cassegrain à illumination décalée avec cornet conique cannelé

Figure 4 – *Mesures de niveaux de polarisations croisées d'antennes à réflecteur double à illumination décalée (Polarisation principale: horizontale)*

Les antennes des stations terriennes sont, en général, exposées aux intempéries et une partie de leur surface est fréquemment couverte d'une pellicule d'eau. Des calculs théoriques ont montré que, en polarisation rectiligne, les effets de ces fines pellicules sur les réflecteurs d'antennes réelles de stations terriennes n'abaisseront pas le découplage au-dessous de 35 dB dans des directions proches de l'axe de l'antenne, pour les fréquences inférieures à 30 GHz [Popović, 1975 et 1976].

2. Antennes des stations terriennes

Le Tableau I ci-après donne des résultats de mesure obtenus avec des antennes de station terrienne du type Cassegrain, de 1,2 et 3,0 m de diamètre, fonctionnant avec des systèmes d'alimentation à cornet cannelé, et conçus pour les bandes des 11 et 14 GHz, avec polarisation rectiligne; ces mesures ont été faites à 11,6 GHz:

TABLEAU I

Discrimination de polarisation de deux antennes (dB)		
Diamètre d'antenne	Région du faisceau principal	
	-1 dB	-3 dB
1,2 m	50	42,5
3,0 m	42,5	40,0

La discrimination de polarisation de ces antennes est un peu meilleure à 11,6 GHz qu'à 14,25 GHz.

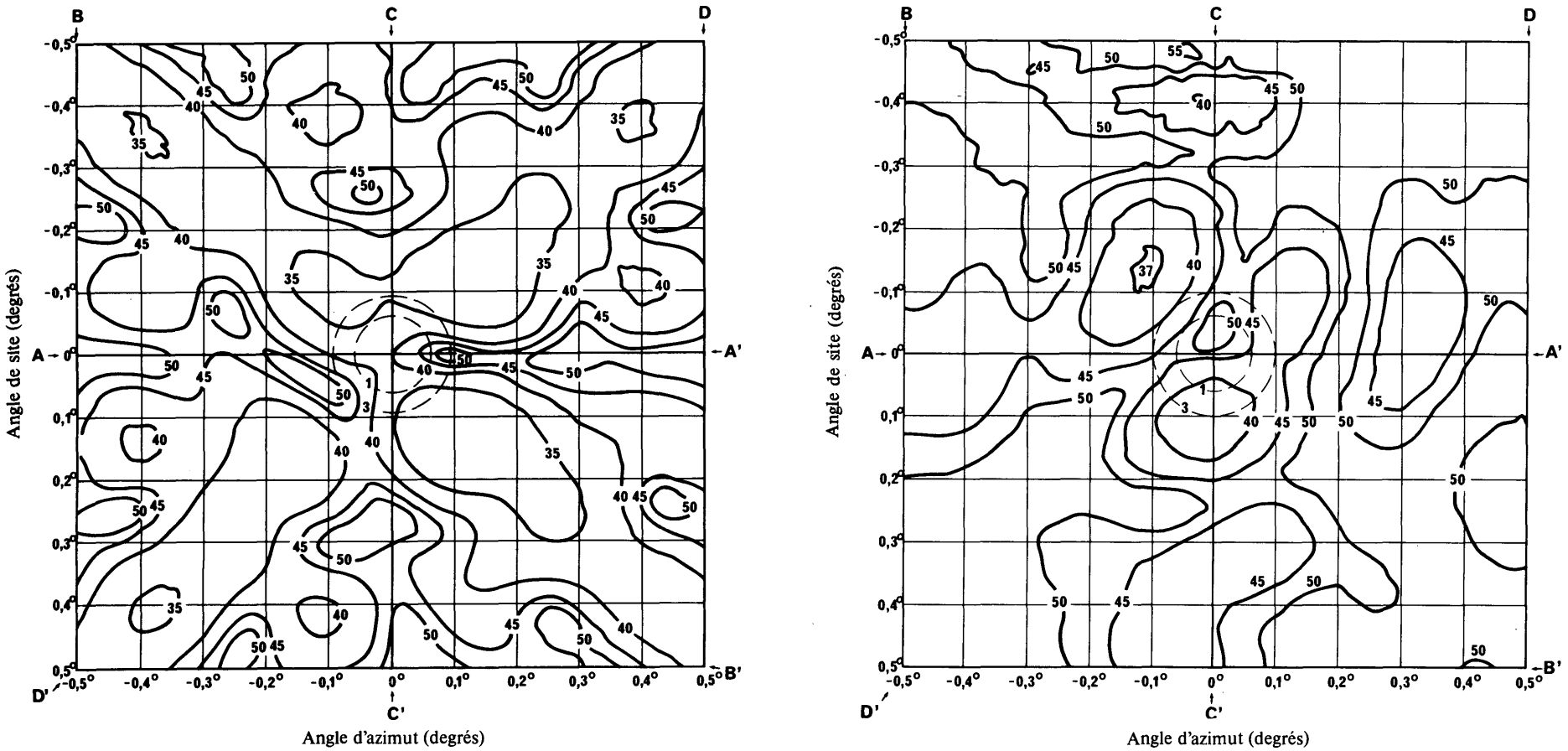
Des mesures ont été faites à 11,6 GHz sur une antenne Cassegrain équipée d'un réflecteur principal parabolique de 10 m et d'un réflecteur secondaire hyperbolique de 1,1 m, dont les supports étaient placés dans les plans à 45°. Ces mesures n'ont pas révélé de différences notables entre les diagrammes directs lorsque le vecteur polarisation était incliné à 45° sur la verticale, c'est-à-dire parallèle à un des couples de supports. En revanche, la Fig. 5 fait apparaître des différences notables entre les diagrammes en polarisation croisée; la discrimination en polarisation croisée s'améliorait lorsque le vecteur polarisation était parallèle aux supports. En polarisation verticale, les valeurs de mesure de la discrimination de polarisation sont plus petites dans les plans parallèles aux supports. Ce résultat s'explique par le fait que les supports n'ont pas la même influence sur l'onde incidente selon que sa polarisation est parallèle ou perpendiculaire aux supports.

On a fait une série de mesures sur une antenne de station terrienne Cassegrain de 32 m de diamètre avec une source périscopique à 4 réflecteurs. La Fig. 6 montre les taux d'ellipticité, y compris la caractéristique globale de polarisation de l'antenne, mesurée par la méthode de phase/amplitude avec le satellite Intelsat IV-A (F-3) et par la méthode de pointage optique. Cette figure montre aussi les résultats d'essai en usine des éléments d'alimentation. La Fig. 7 représente les contours de contrapolarisation de la même antenne à 3925 MHz mesurés par la méthode de pointage optique. Les flèches indiquent l'état de polarisation: la longueur de la flèche est proportionnelle aux taux d'ellipticité (dB) et sa direction indique l'orientation de l'axe principal de l'ellipse de polarisation.

Les caractéristiques mesurées d'une antenne à réflecteur symétrique sont représentées dans la Fig. 8. Il s'agit d'une antenne Cassegrain de type A de 32 m du système INTELSAT fonctionnant avec un système d'alimentation à cornet cannelé, construite en vue d'une haute qualité d'exploitation avec réutilisation des fréquences. Dans le faisceau principal, jusqu'à la région de -1 dB, on a obtenu couramment une discrimination supérieure à 35 dB (TE = 0,3 dB) avec le système complet en polarisation circulaire. L'antenne proprement dite, sans coupleur TM_{01} * ni polarisateur en mode de poursuite, permet d'atteindre couramment une discrimination supérieure à 41 dB (TE = 0,15 dB).

Les Fig. 9 et 10 donnent des exemples de mesures de diagrammes pour de grands angles en polarisation rectiligne avec des antennes de stations terriennes relativement petites, sans polariseurs. Cependant, d'autres mesures portant sur des antennes de plus grandes dimensions ont montré que cette valeur élevée de discrimination n'est pas toujours réalisable [Haidle et Fitzgerrell, 1977].

* *TM*: Tracking mode (mode de poursuite).



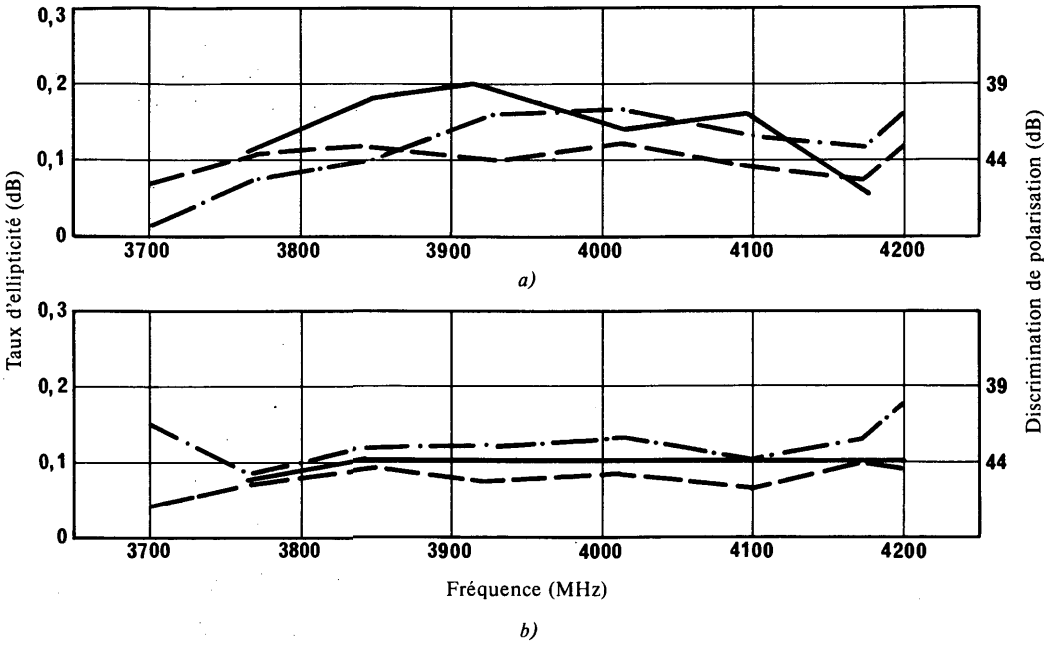
a) Polarisation verticale

b) Polarisation à 45°

FIGURE 5 – *Niveaux mesurés de polarisations croisées, dans le cas d'une antenne de 10 m (11,6 GHz, polarisation rectiligne)*

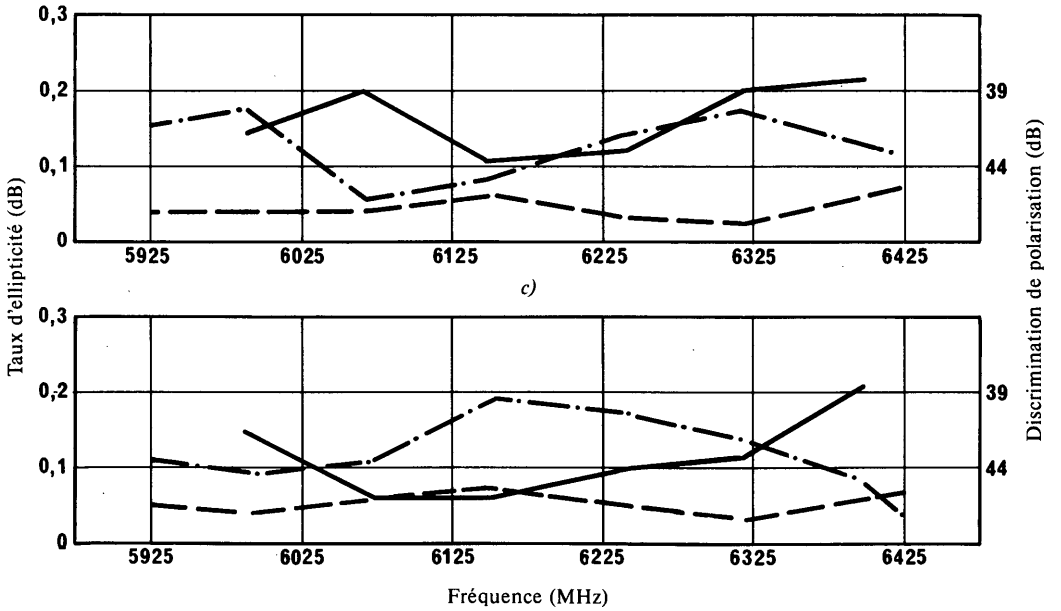
——— Polarisations croisées

– – – – Même polarisation



a) Polarisation circulaire lévogyre (gauche)

b) Polarisation circulaire dextrogyre (droite)



c) Polarisation circulaire dextrogyre (droite)

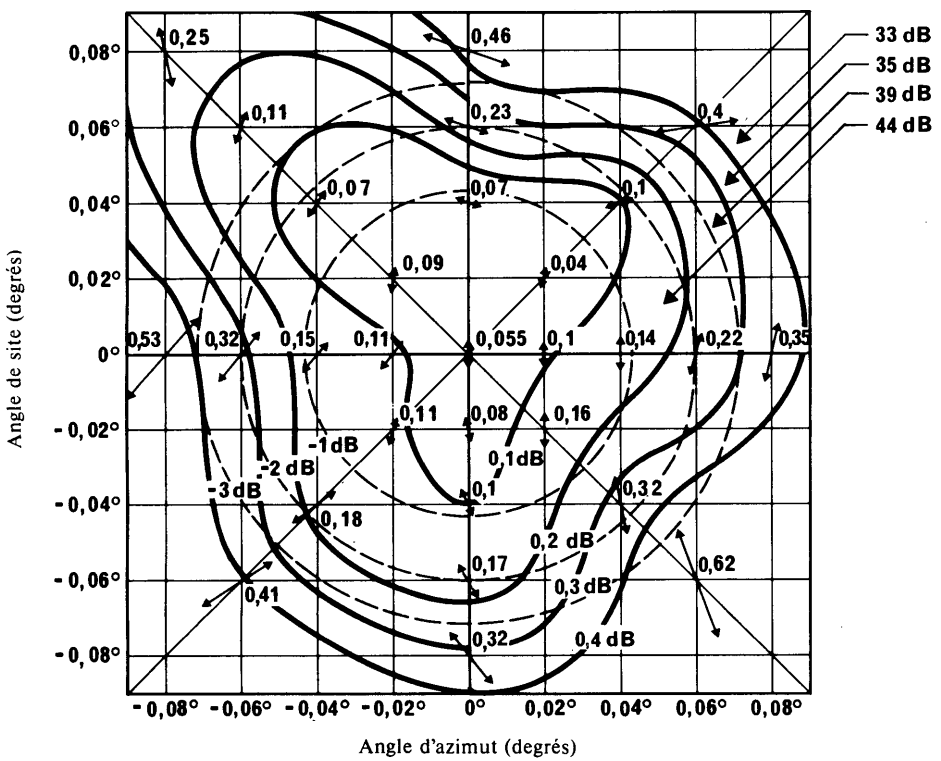
d) Polarisation circulaire lévogyre (gauche)

FIGURE 6 – *Caractéristiques de l'antenne de station terrienne*

——— Caractéristique globale mesurée par la méthode de l'antenne de référence utilisant les signaux émis par un satellite

—·—·—·— Caractéristique globale mesurée par la méthode de pointage optique

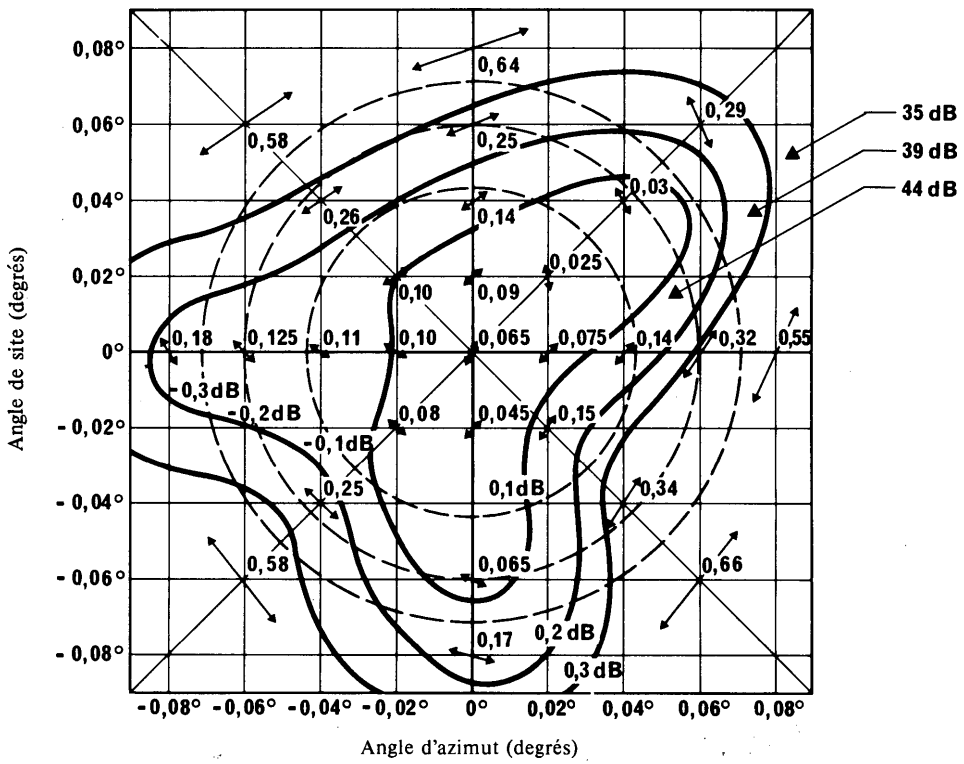
— — — — Résultats d'essai des éléments d'alimentation en usine



a)

f = 3925 MHz

Copolaire: polarisation circulaire dextrogyre (droite)
Contrapolaire: polarisation circulaire lévogyre (gauche)



b)

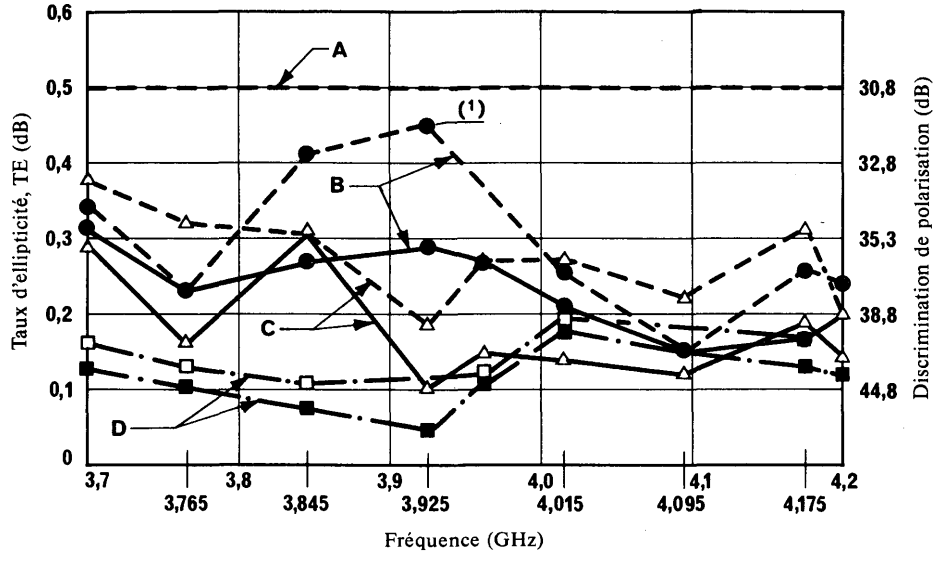
f = 3925 MHz

Copolaire: polarisation circulaire lévogyre (gauche)
Contrapolaire: polarisation circulaire dextrogyre (droite)

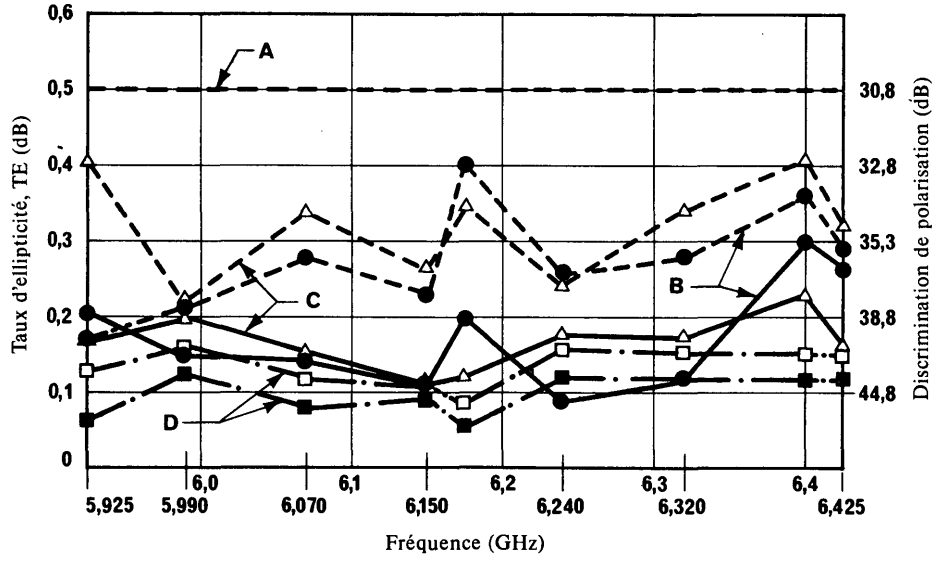
FIGURE 7 – *Contours de contrapolarisation de l'antenne de station terrienne*

——— polarisation contrapolaire

– – – – polarisation copolaire



a)



b)

FIGURE 8 – *Taux d'ellipticité de l'antenne Raisting 4, mesuré avec un émetteur dans l'axe de visée*

A : Spécification INTELSAT

B : PCG: polarisation circulaire lévogyre (gauche)

C : PCD: polarisation circulaire dextrogyre (droite)

D : PCG/PCD

dans une ouverture de 1 dB

dans l'axe

dans l'axe

dans une ouverture de 1 dB – mais sans coupleur TM_{01} ni polariseur; valeurs obtenues à partir de mesures effectuées en polarisation rectiligne

(1) une valeur unique

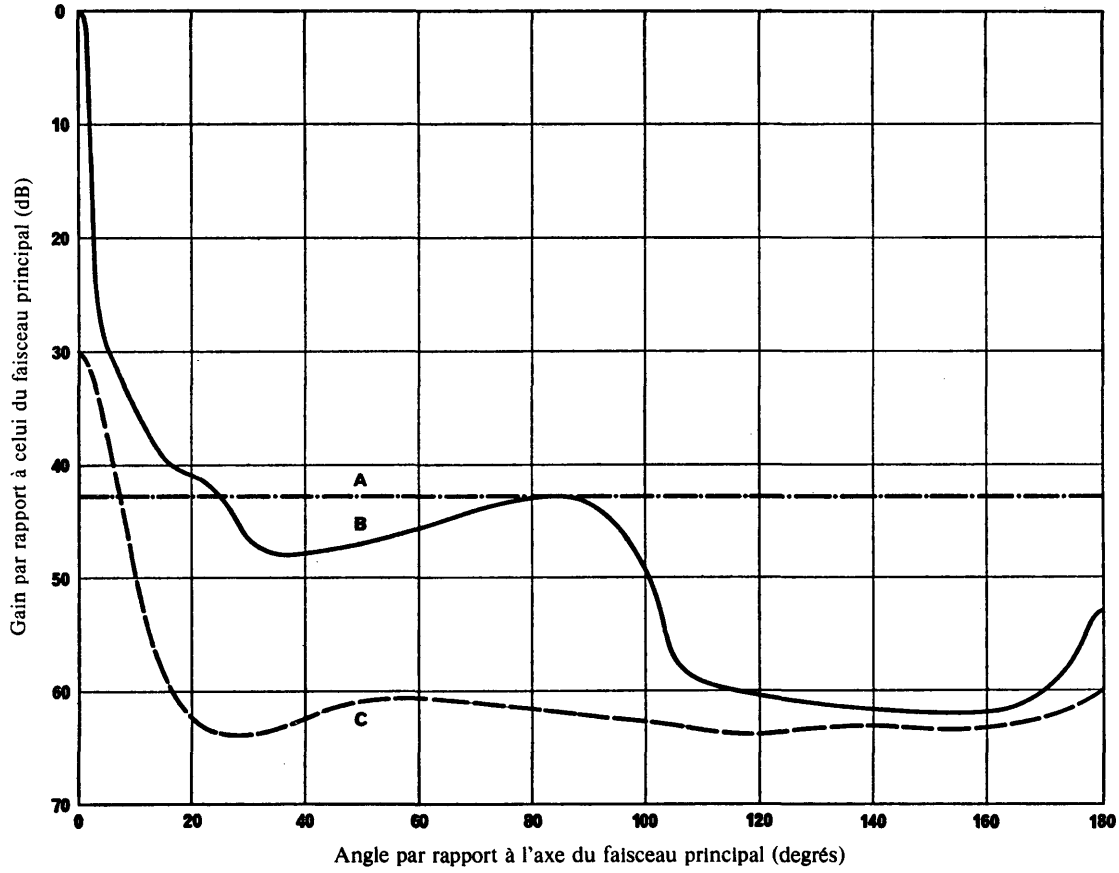


FIGURE 9 – *Enveloppe du diagramme de rayonnement pour les cas de polarisations identiques et de polarisations croisées, pour une antenne de 3 m (10 feet)*

Enveloppe des valeurs de crête des lobes latéraux dans le plan horizontal à 6 GHz

A: isotrope
B: réponse à un signal polarisé verticalement
C: réponse à un signal polarisé horizontalement

Gain: 42,8 dB à 6 GHz

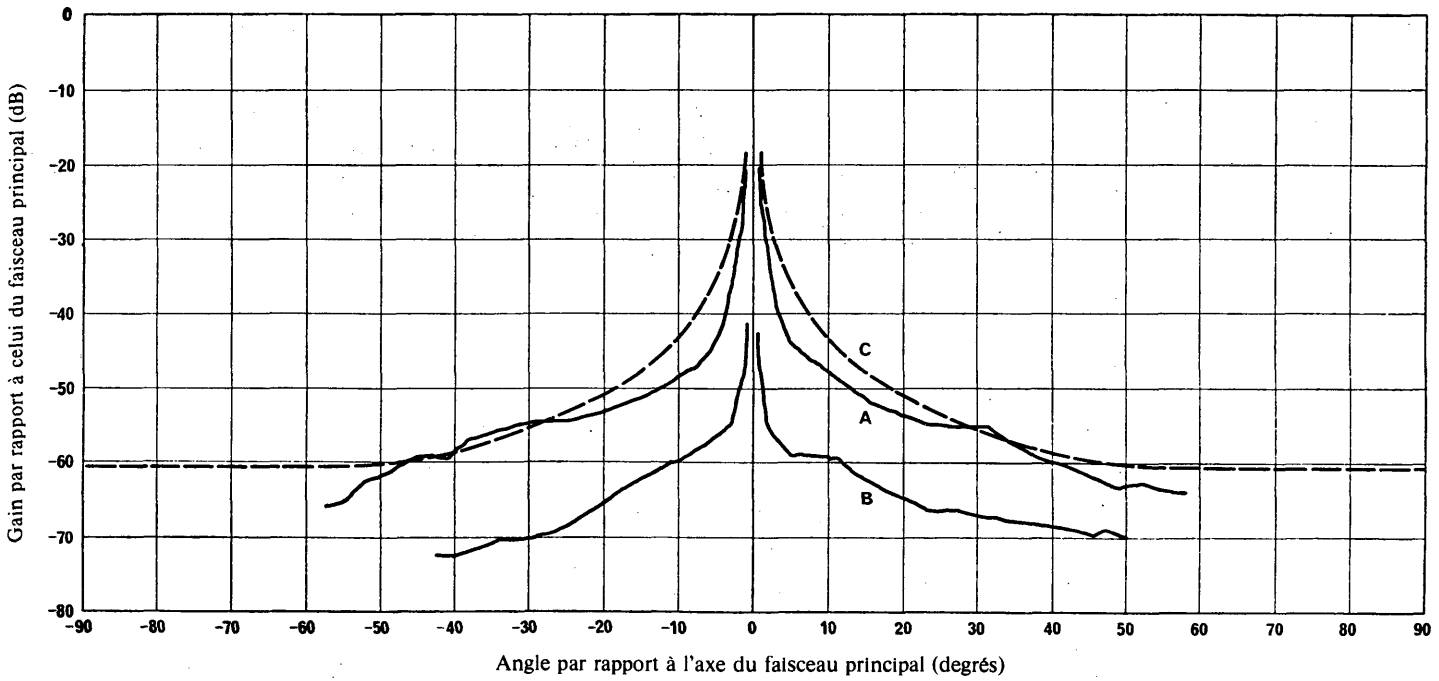


FIGURE 10 – *Diagrammes d'antenne pour polarisations identiques et polarisations croisées, pour une antenne à polarisation rectiligne de 3,6 m (12 feet) avec réflecteur circulaire à alimentation grégorienne (plan E) à 10,5 GHz*

A : polarisations identiques
B : polarisations croisées
C : diagramme de référence de l'Avis 465

Des données statistiques sur la distribution des crêtes de rayonnement contrapolaire dans les lobes latéraux peuvent être obtenues à partir de 6 sources différentes:

a) dans la région angulaire comprise entre 0,5° et 4,0°, à partir d'une station INTELSAT de norme A utilisant comme élément rayonnant un cornet réflecteur conique et un duplexeur modifié;

b) dans la région angulaire comprise entre 0,4° et 10°, à partir d'une nouvelle antenne de 32 m de diamètre construite en vue de la réutilisation des fréquences avec le satellite Intelsat-V et utilisant un élément rayonnant à cornet cannelé comme source périscopique;

c) dans la région angulaire comprise entre 1° et 120°, à partir d'une antenne de petites dimensions ($D/\lambda = 162$) utilisant un cornet cannelé;

d) dans la région angulaire comprise entre 1,5° et 85°, à partir de deux antennes de stations terriennes japonaises du système INTELSAT (antennes Cassegrain alimentées par une source périscopique);

e) dans la région angulaire comprise entre 0,4° et 10°, à partir d'une antenne de type A du système INTELSAT, fonctionnant aux Pays-Bas, et utilisant un système d'alimentation à source périscopique et double réflecteur avec cornet cannelé et duplexeur modifié;

f) dans la région angulaire comprise entre 0,4° et 20°, à partir d'un nombre important d'antennes de type A du système INTELSAT, mises en service après 1977 et testées en vue de la réutilisation des fréquences pour être exploitées avec les satellites Intelsat-V.

Les données énumérées sous *a)* à *e)* ci-dessus sont illustrées à la Fig. 11 qui représente les niveaux les plus défavorables (10%) des crêtes de rayonnement contrapolaire dans les lobes latéraux.

Les données *f)* sont illustrées aux Fig. 12 et 13 qui présentent les résultats de l'analyse effectuée sur les données accumulées au cours des mesures de contrôle de 29 antennes INTELSAT de type A installées postérieurement à 1977; ces mesures ont montré que les antennes en question satisfont à l'enveloppe de gain donnée par $G = 32 - 25 \log \varphi$ (c'est-à-dire que 90% au moins des crêtes des lobes latéraux se trouvent comprises dans cette limite). On a représenté graphiquement les distributions statistiques des niveaux de rayonnement contrapolaire de l'antenne d'émission dans les lobes latéraux par accroissements successifs de l'ouverture du faisceau jusqu'à 20° par rapport à l'axe du faisceau principal. Ces distributions ont été comparées à deux enveloppes de gain, soit $32 - 25 \log \varphi$ et $23,6 - 20 \log \varphi$. Un peu plus de la moitié des antennes mesurées satisfont à l'enveloppe de gain de référence de $23,6 - 20 \log \varphi$ dans la région angulaire comprise entre 1° et 7° à partir de l'axe du faisceau principal. Dans la région comprise entre 7° et environ 20° par rapport à l'axe, moins de la moitié de ces antennes satisfont à la relation de gain $G = 23,6 - 20 \log \varphi$, ce qui montre qu'il serait peut-être nécessaire dans cette région angulaire d'appliquer une valeur d'enveloppe de gain différente. Il faudra des études complémentaires pour déterminer les caractéristiques de rayonnement contrapolaire dans les lobes latéraux des antennes au-delà de 20°. D'après ces données et d'après un raisonnement physique, on peut formuler les observations suivantes:

– il ne faut pas s'attendre à avoir un rapport de discrimination de polarisation dans la région angulaire située au-delà de 50° par rapport au faisceau principal;

– il ne faut pas espérer qu'en apportant de simples modifications aux antennes existantes, on obtiendra un rapport de discrimination de polarisation significatif aux grands angles.

Etant donné que les crêtes de rayonnement contrapolaire et de rayonnement copolaire dans les lobes latéraux ont des niveaux comparables pour les angles supérieurs à 50° et que dans les nouvelles antennes, les crêtes de rayonnement contrapolaire ont des niveaux légèrement inférieurs, il en résulte que les crêtes suivent une loi qui se modifie moins rapidement en fonction de l'angle que la relation $25 \log \varphi$.

Avec une relation $20 \log \varphi$, on obtient un diagramme de rayonnement contrapolaire de référence de:

G (polarisation contrapolaire) $= 23,6 - 20 \log \varphi$

Cette relation est représentée sur les Fig. 11 et 12 et il apparaît que ce diagramme inclut généralement les niveaux les plus défavorables (10%) des crêtes de rayonnement contrapolaire dans les lobes latéraux des nouvelles antennes.

3. Antennes des satellites

Les Fig. 3a) et 3b) donnent les contours de polarisations croisées pour des cornets coniques et des réflecteurs à cornet conique, ces deux types de dispositif étant largement utilisés à bord des satellites; ces figures, qui sont tracées pour des faisceaux ayant une symétrie très sensiblement axiale, montrent qu'on obtient des performances élevées quand on est près de la symétrie de révolution.

Les expériences ont montré qu'il est possible d'obtenir une discrimination de polarisation de 30 dB avec des antennes spécialement conçues pour les satellites, en polarisation rectiligne et circulaire, pour des antennes avec réflecteur alimenté par l'avant (voir les Fig. 14 et 15). Le faisceau elliptique, représenté à la Fig. 15, a été obtenu grâce à un profilage du réflecteur. Lorsqu'on a utilisé la même antenne en polarisation circulaire, on a obtenu une structure complexe des contours de polarisations croisées; ce résultat est dû aux effets des supports d'antenne et à l'interaction avec le diagramme de phase du cornet d'alimentation primaire.

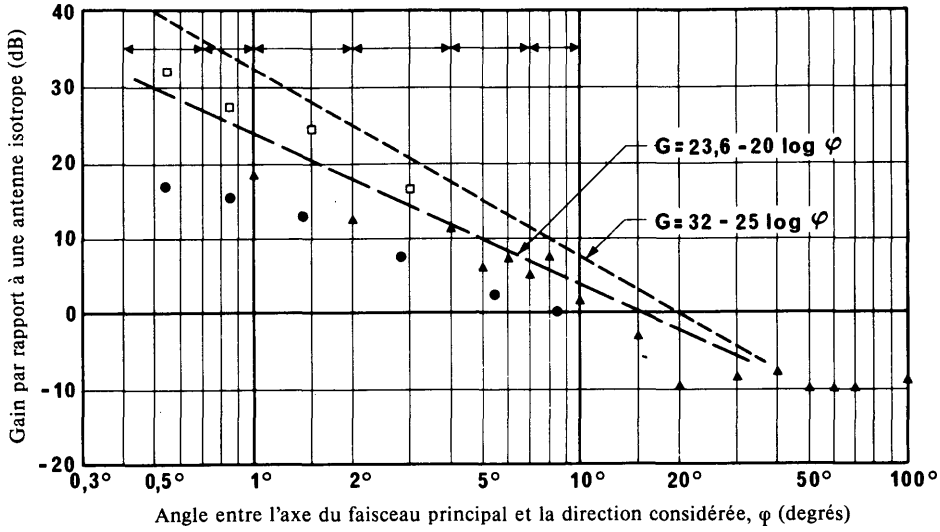


FIGURE 11 – *Distribution statistique des crêtes de rayonnement contrapolaire dans les lobes latéraux*

● Doc. 4/94 (Italie)
▲ Doc. 4/70 (Etats-Unis)*
□ Doc. 4/88 (Pays-Bas)

} niveaux dépassés par 10% des crêtes des lobes latéraux

— — — Diagramme de rayonnement copolaire de référence

*Valeurs données pour angles discrets (1°, 2°, 4°, etc. comme indiqué)

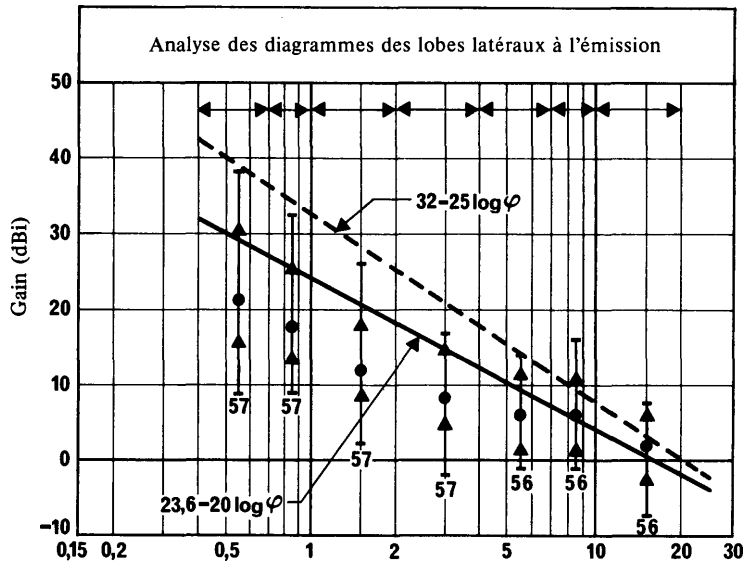


FIGURE 12 – *Distribution des niveaux des lobes latéraux dans les diagrammes contrapolaires à polarisation circulaire pour des antennes du type A-INTELSAT*

Caractéristiques des antennes:

Type: INTELSAT Norme A
Diamètre: env. 30 m
Fréquence: 5990-6400 MHz
Polarisation: Contrapolarisation à gauche et à droite

Largeur de l'échantillon

: valeur maximale
: plus mauvaise valeur à 10%
: valeur médiane
: meilleure valeur à 10%
: valeur minimale

56 : nombre d'échantillons

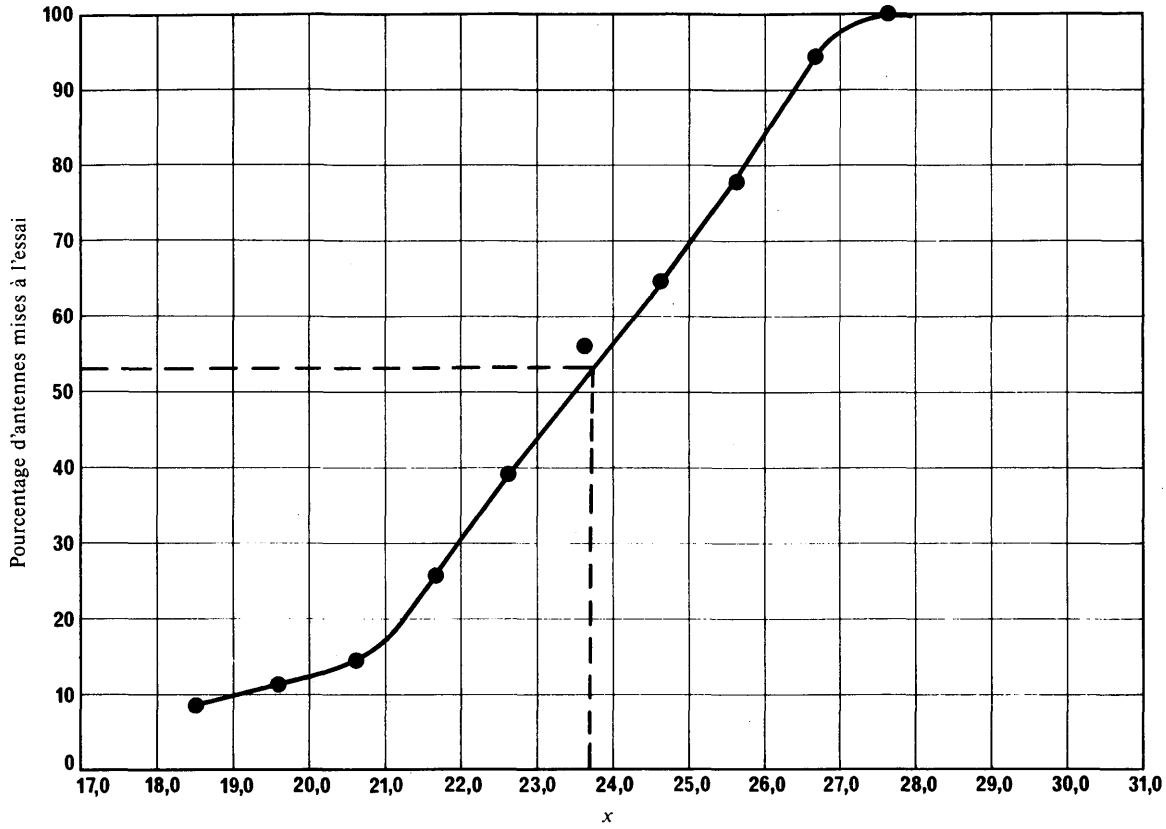
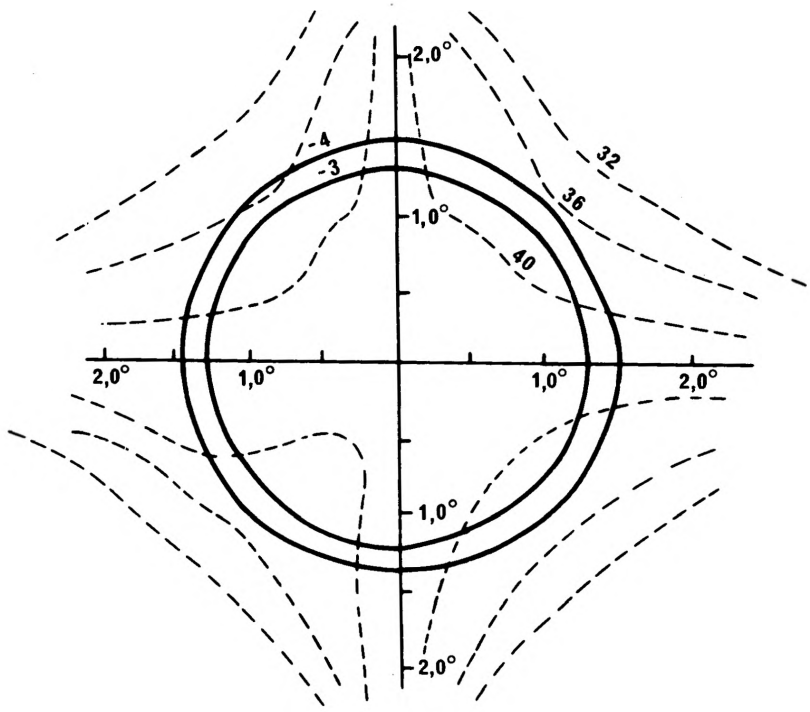


FIGURE 13 - *Antennes de la classe A-INTELSAT: diagrammes contrapolaires*

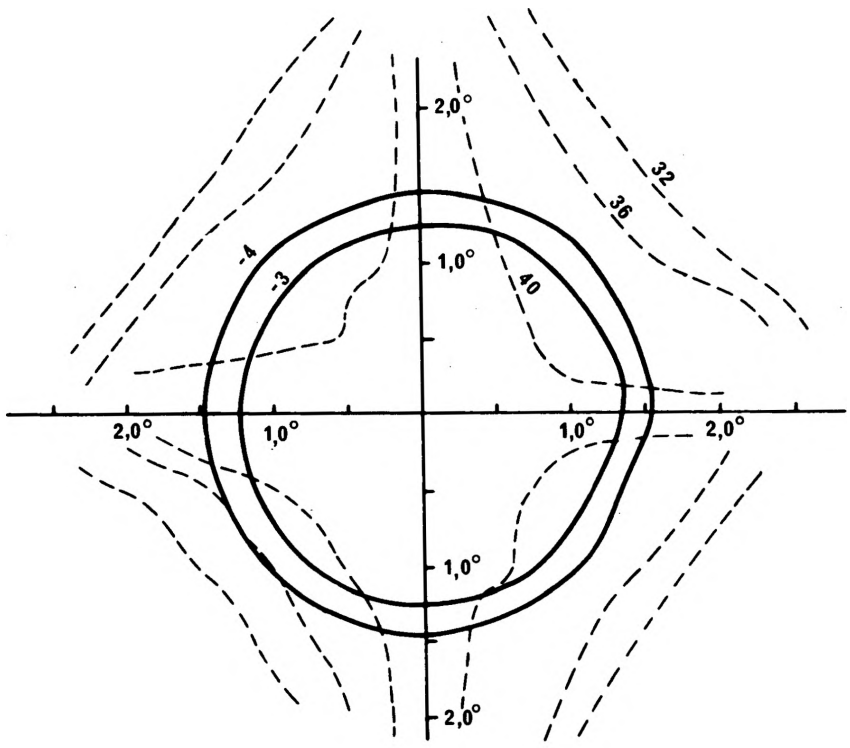
Enveloppe de gain ($x - 20 \log \varphi$)

Il convient de noter que les antennes avec réflecteur alimenté par l'avant, qui ont fait l'objet d'essais, ont des ouvertures relativement petites et que, par conséquent, la présence des supports du système d'alimentation a eu une influence notable et défavorable sur la discrimination de polarisation et sur le rendement. Les antennes avec réflecteur à illumination décalée offrent, quant à elles, de plus grandes possibilités à ces deux points de vue (voir les Fig. 4*a)* et 4*b)* et la Fig. 16). Dans le cas de polarisation circulaire, la discrimination globale de polarisations croisées peut être limitée par le taux d'ellipticité du polariseur que l'on peut obtenir.

Dans le cas de satellites exigeant des faisceaux multiples ou modelés, les configurations à réflecteur décalé sont particulièrement intéressantes, étant donné qu'elles permettent d'éviter un blocage excessif par les systèmes d'alimentation associés. Des problèmes plus complexes, parmi lesquels l'interaction des éléments d'alimentation adjacents, doivent être pris en considération dans la conception de ces antennes à discrimination de polarisation élevée.



a) Accès 1



b) Accès 2

FIGURE 14 – *Courbes d'égales valeurs pour le faisceau circulaire à polarisation rectiligne (valeurs en dB)*

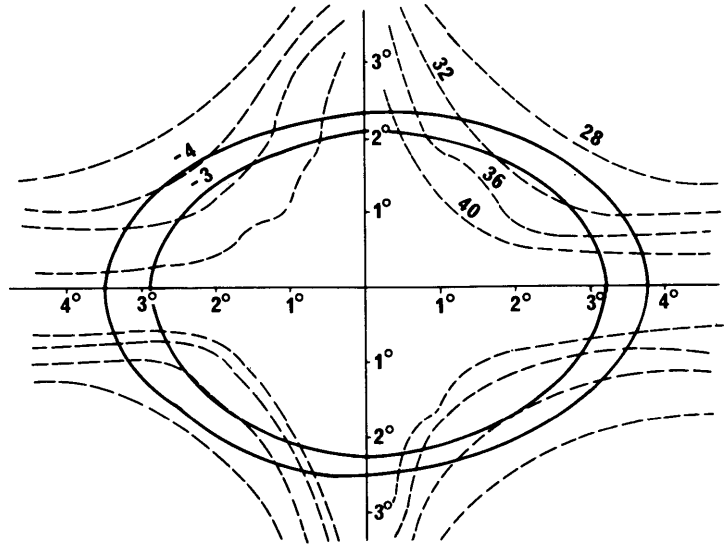
——— Courbes d'égales valeurs avec même polarisation

– – – – Courbes d'égales valeurs de discrimination de polarisation

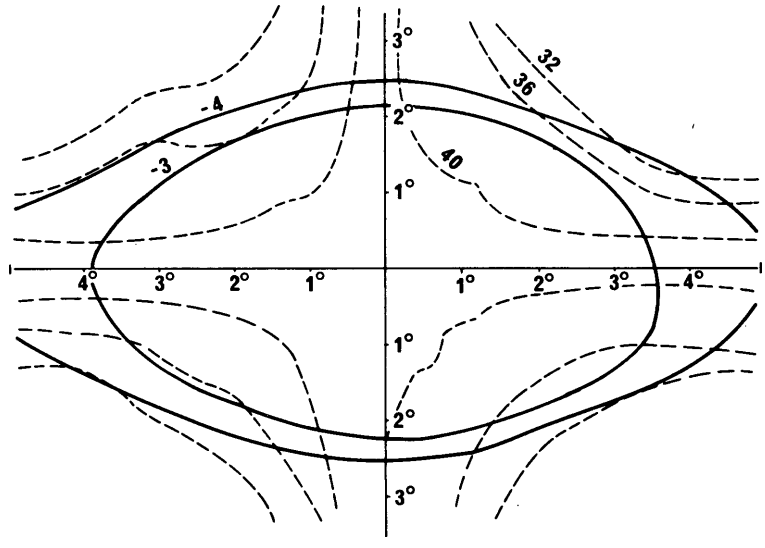
Fréquence: 11,58 GHz

Ouverture de faisceau nominale (3 dB): 2,5° × 2,5°

Gain de crête mesuré: 36,4 dB



a) Accès 1



b) Accès 2

FIGURE 15 – *Courbes d'égales valeurs pour le faisceau elliptique à polarisation rectiligne (valeurs en dB)*

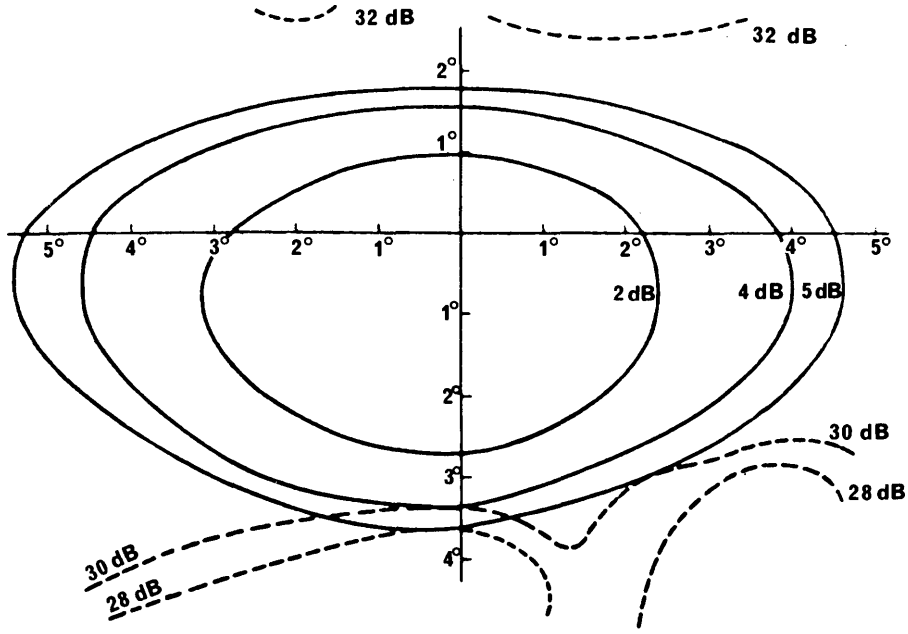
——— Courbes d'égales valeurs avec même polarisation

– – – – Courbes d'égales valeurs de discrimination de polarisation

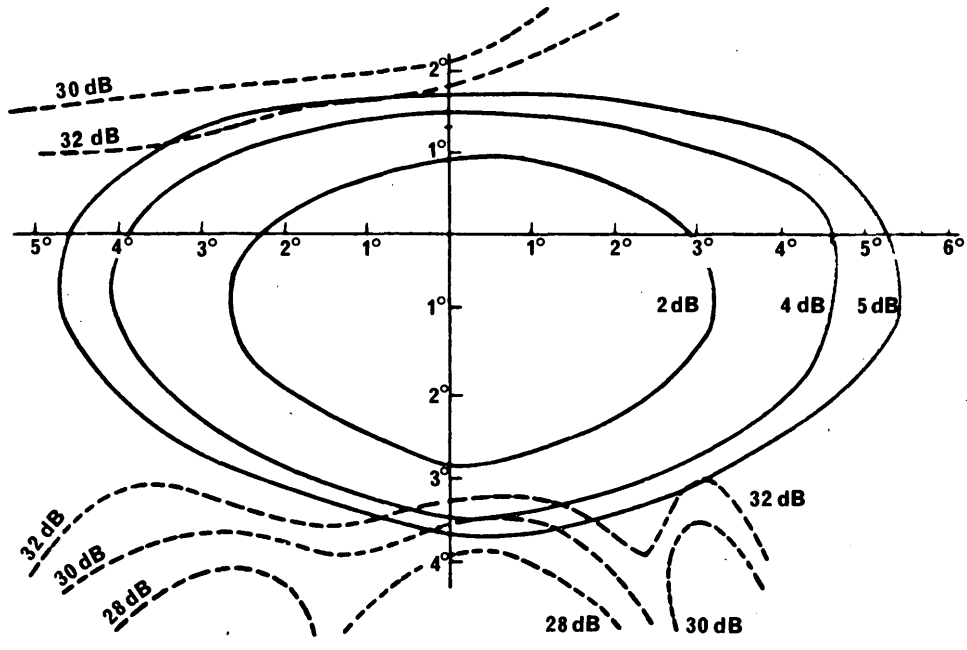
Fréquence: 14,173 GHz

Ouverture de faisceau nominale (3 dB): 7,5° × 4,25°

Gain de crête mesuré: 28,8 dB



a) Accès 1



b) Accès 2

FIGURE 16 – *Courbes d'égales valeurs pour une antenne à illumination décalée et polarisation circulaire (valeurs en dB)*

———— Courbes d'égales valeurs avec même polarisation

– – – – – Courbes d'égales valeurs de discrimination de polarisation

Fréquence: 11,8 GHz

Ouverture de faisceau nominale (3 dB): 7,5° × 4,25°

Gain de crête mesuré: 28,8 dB

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GANS, M. J. [mars 1976] Cross-polarization in reflector-type beam waveguides and antennae. *BSTJ*, Vol. 55, **3**, 289-316.

GANS, M. J. et SEMPLAK, R. A. [septembre 1975] Some far-field studies of an offset launcher. *BSTJ*, Vol. 54, **7**, 1319-1340.

HAIDLE, L. L. et FITZGERRELL, R. G. [mai 1977] Hemispherical power gain pattern measurements at 7,5 GHz. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-25, **3**, 373-376.

MIZUGUTCH, Y., AKAGAWA, M. et YOKOI, H. [octobre 1976] Offset dual reflector antenna. IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) International Symposium Mass., Etats-Unis d'Amérique.

POPOVIĆ, B. [1975] Cross-polarization effects due to a water film on a Cassegrain reflector in frequency range 10-30 GHz. COST/TELECOM 2/TD 30/75. Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, République socialiste fédérative de Yougoslavie.

POPOVIĆ, B. [1976] Off-axis cross-polarization due to a water film on reflector surfaces of a Cassegrainian antenna. COST/TELECOM 2/TD 36/76, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, République socialiste fédérative de Yougoslavie.

RUDGE, A. W. et ADATIA, N. A. [1975] New class of primary-feed antennae for use with offset parabolic-reflector antennae. *Electron. Lett.*, Vol. 11, 597.

Documents du CCIR

[1978-1982]: **a.** 4/269 (Japon); **b.** 4/280 (Pays-Bas); **c.** 4/308 (INTELSAT); **d.** 4/327 (Allemagne, République fédérale d').

BIBLIOGRAPHIE

SHKAROVSKY, I. P. et MOODY, H. J. [septembre 1976] Performance characteristics of antennae for direct broadcasting satellite systems including effects of rain depolarization. *RCA Rev.*, Vol. 37, **3**, 279-319.

ANNEXE II

MESURE DE LA DÉPOLARISATION DES ANTENNES DE STATIONS TERRIENNES

1. Choix des méthodes de mesure utilisant les signaux émis par un satellite

Si les signaux émis par le satellite ont une polarisation très pure, la méthode directe de découpage peut être employée. Dans le cas où la polarisation des signaux émis par le satellite est défectueuse, la mesure peut devenir moins précise en raison de l'effet de dépolarisation du satellite. L'antenne de référence de polarisation est nécessaire pour éliminer l'incertitude introduite par la dépolarisation du satellite.

Les deux méthodes sont applicables dans la pratique. La Fig. 17 montre les critères à appliquer pour choisir une méthode de mesure, méthode directe de découplage ou méthode de l'antenne de référence.

2. Considérations relatives à la méthode de l'antenne de référence

Une mesure précise de la polarisation a été mise au point [DiFonzo et Trachtman, 1978]; elle utilise une antenne de référence de polarisation et un réseau d'adaptation de polarisation dans lequel on recherche une valeur nulle du signal à l'une des bornes du transducteur orthomode pour déterminer l'état de polarisation. Cette méthode peut être appelée «méthode de zéro».

La «méthode de phase/amplitude», récemment mise au point [Satoh et Makita, 1980] a prouvé son efficacité pour la mesure de taux d'ellipticité ne dépassant pas 0,2 dB pour des grandes antennes. La méthode de zéro et la méthode de phase/amplitude sont comparées au Tableau II.

La méthode de phase/amplitude utilisant une antenne de référence de polarisation est considérée comme préférable et mieux applicable à la mesure précise de la polarisation des grandes antennes.

La Fig. 18*a)* montre la configuration de mesure de la dépolarisation à la réception avec la «méthode phase/amplitude». Un signal porteur f_1 est émis par une station terrienne pour obtenir un signal de satellite f_2 qui sert à mesurer la dépolarisation à la réception de la station terrienne. Grâce à la détection de phase/amplitude des deux signaux reçus aux bornes du transducteur orthogonal de l'antenne, on connaît la dépolarisation globale sur la liaison descendante. Les caractéristiques de dépolarisation de réception de l'antenne concernée peuvent être obtenues en soustrayant de la dépolarisation globale mesurée sur la liaison descendante le vecteur de dépolarisation d'émission du satellite. Ce vecteur peut être déterminé en utilisant l'antenne de référence de polarisation, les éléments d'alimentation de celle-ci ayant subi une rotation de 90°. La Fig. 18*b)* montre le dispositif de mesure de la dépolarisation d'émission avec la méthode de phase/amplitude. Un signal porteur f_1 et un signal à modulation de phase bivalente $f_1 \pm \Delta f$ sont émis par la station terrienne avec deux polarisations orthogonales circulaires. La composante de contrapolarisation introduite par la dépolarisation sur la liaison montante est contenue dans le signal de copolarisation retour $f_2 \pm \Delta f$. Le signal de contrapolarisation peut être séparé du signal de copolarisation par la détection de phase/amplitude, puisqu'il existe une corrélation entre les signaux f_1 et $f_1 \pm \Delta f$, ce qui permet d'obtenir la dépolarisation globale sur la liaison montante. Par un procédé analogue, la dépolarisation d'émission de l'antenne concernée peut être obtenue au moyen d'une antenne de référence de polarisation.

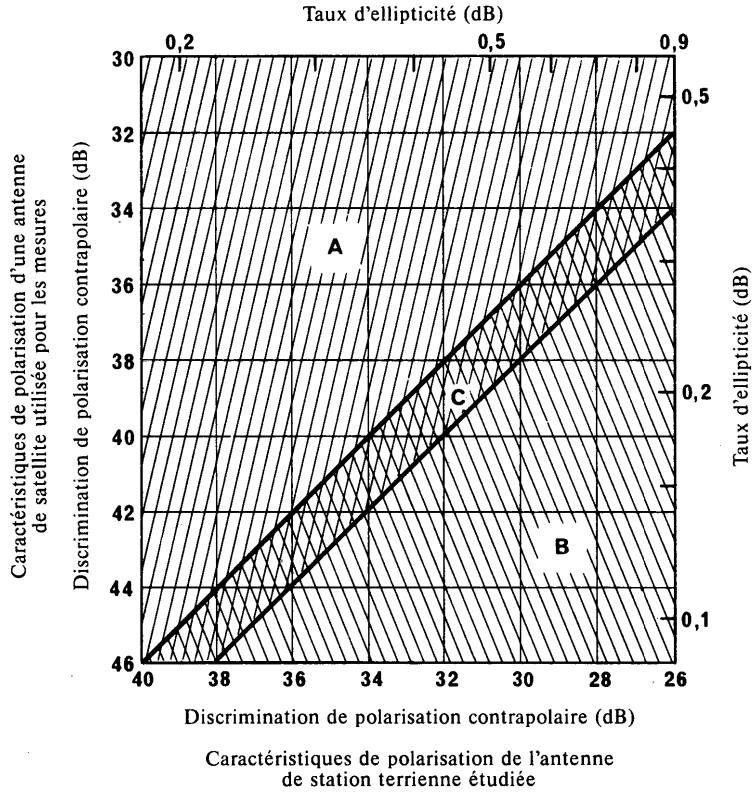


FIGURE 17 – *Critères déterminant le choix de la méthode directe de découplage ou de la méthode de l'antenne de référence*

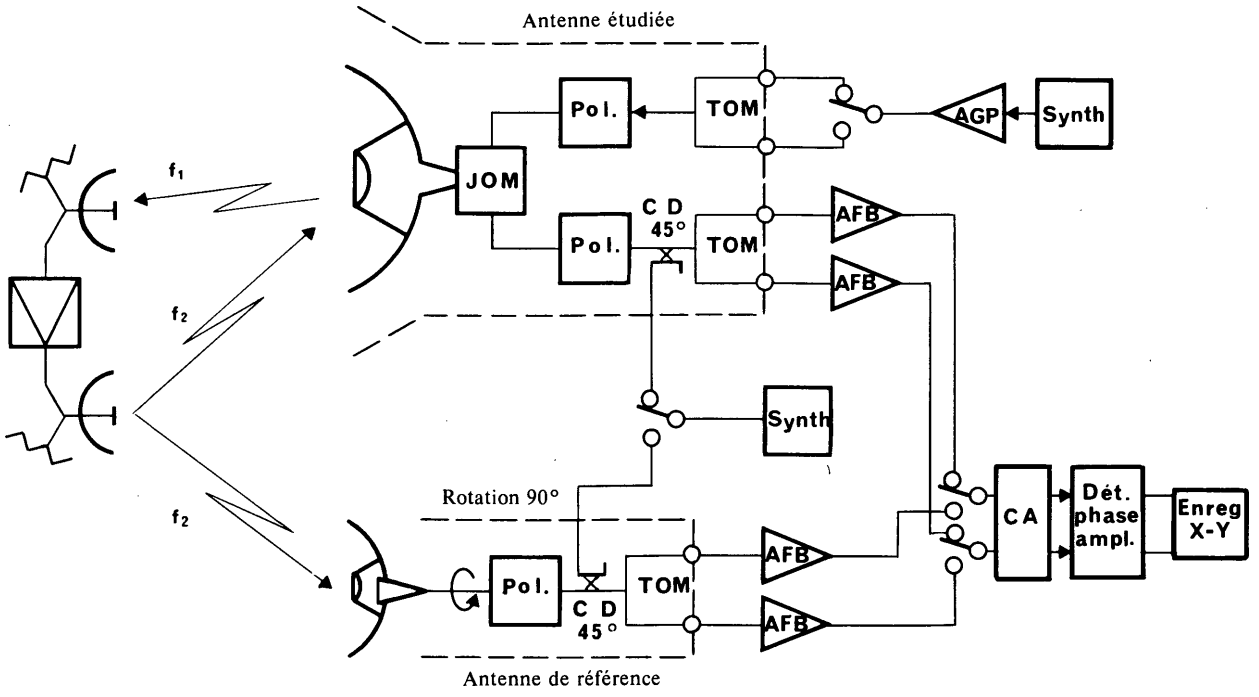
A : méthode de l'antenne de référence

B : méthode directe de découplage

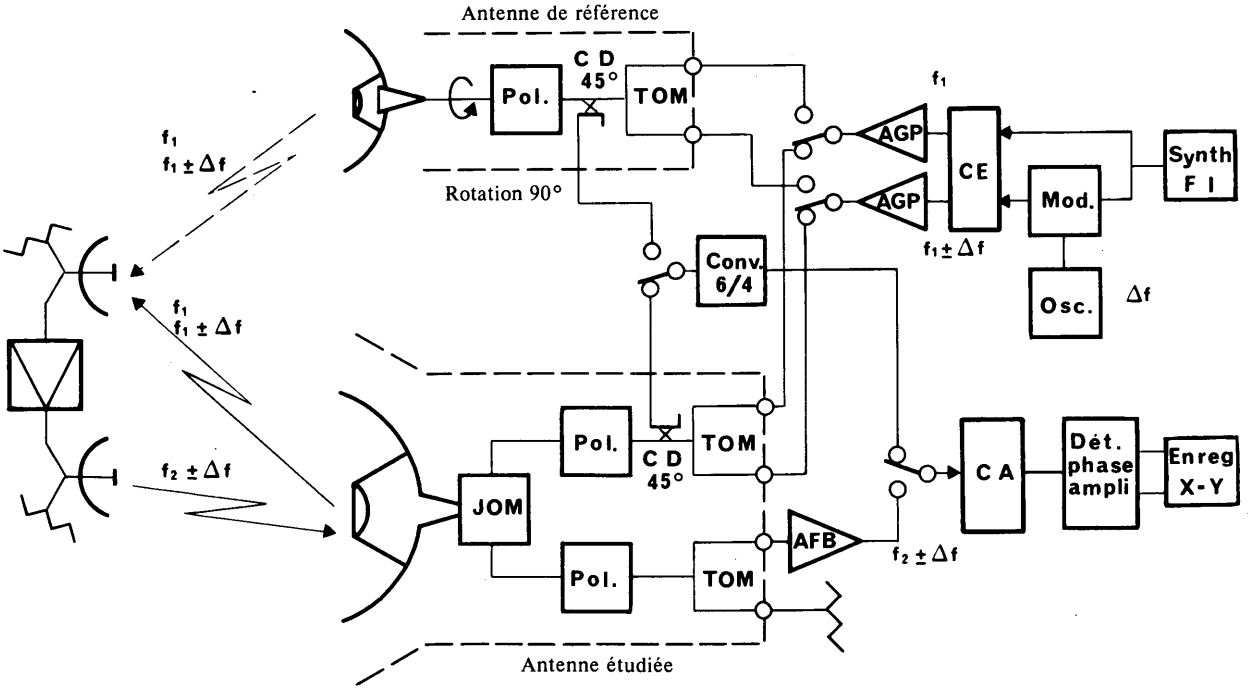
C : zone grise

TABLEAU II – *Comparaison de la méthode de zéro et de la méthode de phase-amplitude*

	Méthode de zéro	Méthode de phase-amplitude
Avantages	Simplicité du générateur et du détecteur de signaux L'état de polarisation (taux d'ellipticité et orientation) sont faciles à obtenir par lecture de l'angle des polariseurs	Seul un traitement électrique du signal peut fournir des résultats précis
Inconvénients	Il est très difficile de remplacer un dispositif d'alimentation volumineux par un réseau d'adaptation de la polarisation Il est impossible de mesurer les caractéristiques globales d'un système d'antenne. (Cette méthode exclut les organes d'alimentation des éléments mesurés)	Il faut des coupleurs directionnels à 45° dans le dispositif d'alimentation de l'antenne mesurée Il faut disposer d'un détecteur de phase-amplitude à haute performance



a) Mesure de la dépolarisation de réception



b) Mesure de la dépolarisation d'émission

FIGURE 18 – *Dispositif de mesure de la dépolarisation d'une antenne de station terrienne*

JOM : duplexeur orthomode
TOM : transducteur orthomode
Pol. : polariseur
AGP : amplificateur de puissance
AFB : amplificateur à faible bruit
CD : coupleur directionnel
CA : mélangeur de réception
CE : mélangeur d'émission
Enreg. : enregistreur X-Y

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DiFONZO, D. F. et TRACHTMAN, W. S. [1978] Antenna depolarization measurements using satellite source. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 8, **1**, 155-185.

SATOH, T. et MAKITA, F. [1980] Measurements method of earth station antenna polarization characteristics. IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S/URSI) International Symposium, Québec, Canada, A/J.5-1.

RAPPORT 557-1

UTILISATION DES BANDES DE FRÉQUENCES ATTRIBUÉES AU SERVICE FIXE PAR SATELLITE, A LA FOIS POUR LA LIAISON MONTANTE ET LA LIAISON DESCENDANTE DES SYSTÈMES A SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

(Programme d'études 2J/4)

(1974-1982)

1. Introduction

Les fréquences assignées à un satellite de radiocommunications sont prises dans deux bandes différentes, respectivement pour la liaison montante et pour la liaison descendante. Une bande donnée est utilisée soit pour la liaison montante, soit pour la liaison descendante, mais pas pour les deux. Cela peut donner naissance à deux trajets de brouillage dans le système:

- brouillage causé par l'émetteur de la station terrienne (signal brouilleur) au récepteur de la station spatiale (signal utile);
- brouillage causé par l'émetteur de la station spatiale (signal brouilleur) au récepteur de la station terrienne (signal utile).

En cas de chevauchement entre les bandes de fréquences occupées par les deux systèmes, l'espacement des satellites doit être suffisant pour ramener ce brouillage à un niveau acceptable.

Toutefois, si deux de ces satellites sont séparés par la distance orbitale minimale requise, il sera peut-être possible d'utiliser un autre satellite, placé entre les deux précédents et rayonnant dans les mêmes bandes de fréquences, avec assignation intervertie des bandes. Par exemple, la bande servant aux transmissions sur la liaison montante pour le troisième satellite serait la même que celle des transmissions sur la liaison descendante pour les deux autres. On peut ainsi obtenir une augmentation de la capacité totale du spectre et de l'arc d'orbite occupés. On peut avoir les trajets de brouillage suivants entre des couples de satellites, à l'intérieur du système, en cas d'utilisation intervertie des bandes de fréquences:

- brouillage causé par l'émetteur d'une station spatiale (signal brouilleur) au récepteur d'une station spatiale (signal utile);
- brouillage causé par l'émetteur d'une station terrienne (signal brouilleur) au récepteur d'une station terrienne (signal utile).

Dans le présent Rapport, on étudie ce mode d'utilisation possible des fréquences en ce qui concerne seulement les services de radiocommunications spatiales, ainsi que les répercussions sur les services de Terre dans les bandes de fréquences partagées. Les études n'ont jusqu'ici porté que sur le cas des satellites géostationnaires; il convient cependant d'examiner les problèmes que peut poser l'assignation, aux satellites géostationnaires, de fréquences utilisables dans les deux sens dans les bandes de fréquences également utilisées par des satellites non géostationnaires.

2. Augmentation réalisable de la capacité orbitale par utilisation d'assignations de fréquence interverties

Le rapport porteuse/brouillage à l'entrée du récepteur d'une station terrienne qui reçoit l'émission d'une autre station terrienne par l'intermédiaire de la station spatiale d'un satellite géostationnaire, en présence d'un second système fonctionnant dans les mêmes conditions, dont la station spatiale est séparée de la première par un espacement angulaire géocentrique φ, peut être évalué approximativement à l'aide de la formule suivante:

$$(C/I)^{-1} \approx \frac{p'_e\, g'_1(\varphi)\, g_2(\delta)}{p_e\, g_1\, g_2} + \frac{p'_s\, g_4(\varphi)\, g'_3(\eta)}{p_s\, g_4\, g_3} \qquad (1)$$

dans laquelle:

p_e, p'_e : puissances d'émission fournies aux antennes des stations terriennes respectivement du système utile (p_e) et du système brouilleur (p'_e);

p_s, p'_s : puissances d'émission fournies aux antennes des stations spatiales, respectivement du système utile (p_s) et du système brouilleur (p'_s);

g_1, g_2, g_3, g_4 : gains nominaux dans les lobes principaux des antennes du système utile; les indices désignent les antennes que l'on rencontre successivement sur le trajet de transmission: 1 = émission par la station terrienne; 2 = réception par la station spatiale; 3 = émission par la station spatiale; 4 = réception par la station terrienne;

$g'_1(\varphi)$, $g_4(\varphi)$: gain de l'antenne d'émission de la station terrienne brouilleuse dans la direction de la station spatiale utile ($g'_1(\varphi)$) et gain de l'antenne de réception de la station terrienne utile dans la direction de la station spatiale brouilleuse ($g_4(\varphi)$);

$g_2(\delta)$, $g'_3(\eta)$: gain de l'antenne de réception de la station spatiale utile dans la direction de la station terrienne d'émission brouilleuse ($g_2(\delta)$) et gain de l'antenne d'émission de la station spatiale brouilleuse dans la direction de la station terrienne de réception utile ($g'_3(\eta)$); (δ et η sont les angles de discrimination entre les directions utile et brouilleuse).

Lorsque, dans le système brouilleur, les assignations de fréquence sur les liaisons montante et descendante sont interverties par rapport à celles du système utile, le rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse est donné approximativement par la formule (2) ci-après, étant entendu que tous les brouillages notables seront reçus en provenance de satellites se trouvant à moins de 60° sur l'orbite par rapport au satellite utile.

$$(C/I)_r^{-1} \approx \frac{p'_s\, g'_3(\nu)\, g_2(\varepsilon)\, l_u}{p_e\, g_1\, g_2\, l_0} \quad * \qquad (2)$$

où

$g_2(\varepsilon)$, $g'_3(\nu)$: gain de l'antenne de réception de la station spatiale utile dans la direction de la station spatiale brouilleuse ($g_2(\varepsilon)$) et gain de l'antenne d'émission de la station spatiale brouilleuse dans la direction de la station spatiale utile ($g'_3(\nu)$);

l_u, l_0 : affaiblissements en espace libre sur la liaison montante du système (l_u) et entre les stations spatiales utile et brouilleuse (l_0) fonctionnant dans la même bande de fréquences.

Plusieurs hypothèses sont possibles pour normaliser et simplifier l'évaluation de la capacité potentielle de l'orbite dans le cas où les assignations de fréquence sont interverties par rapport à la capacité dans le cas où elles ne le sont pas:

a) Homogénéité des systèmes

- égalité des puissances des stations terriennes et des satellites;

$$p'_e / p_e = p'_s / p_s = 1$$

- égalité des angles d'ouverture des lobes principaux des antennes des stations spatiales:

$$g_2 = g_3 \ (= g'_2 = g'_3)$$

- égalité des diamètres des antennes des stations terriennes et identité des diagrammes des lobes latéraux exprimées par:

$$g_1(f) = a_1/\rho^b$$
$$g_4(f) = a_4/\rho^b$$

où ρ est l'angle par rapport à l'axe du lobe principal et où a_1, a_4 et b sont des coefficients.

b) Espacement angulaire topocentrique et géocentrique petit et à peu près égal entre stations spatiales, c'est-à-dire:

$$l_0 \approx \varphi^2\, l_u$$

c) Sous-estimation du brouillage entre systèmes fonctionnant avec des assignations de fréquences non interverties, en posant:

$$g_2(\delta) = g'_3(\eta) = 1,$$

formule représentative des réseaux à couvertures distinctes.

---

* Les valeurs de ν et de ε ne seront pas inférieures à 60°.

d) Surestimation du brouillage entre systèmes fonctionnant avec des assignations de fréquence interverties, en posant $g_2(80°) = g'_3(80°) = 1$ (les stations spatiales se voient l'une l'autre sous un angle d'environ $\pi/2$ par rapport à l'axe de leur lobe principal).

e) Dans une bande de fréquences donnée, on suppose que la température de bruit dans les récepteurs des stations spatiales est environ dix fois celle des récepteurs des stations terriennes, et que le rapport porteuse utile/bruit thermique sur la liaison montante n'est pas inférieur à deux fois le même rapport sur la liaison descendante.

Compte tenu des hypothèses précédentes, la somme des brouillages en provenance de plusieurs systèmes fonctionnant avec des assignations de fréquence non interverties et dont les satellites sont uniformément espacés de φ_c, est donnée par l'expression approximative suivante:

$$(C/I)_c^{-1} \approx \frac{2\zeta(b)}{\varphi_c^b}\left[\frac{a_1}{g_1 g_2} + \frac{a_4}{g_3 g_4}\right]^* \tag{3}$$

où a_1 et a_4 se rapportent aux antennes d'émission et de réception de la station terrienne du système utile.

Lorsque des stations spatiales fonctionnant avec des assignations de fréquence interverties sont alternées sur l'orbite avec des stations spatiales fonctionnant sans interversion, l'espacement entre ces stations φ_{rc} étant uniforme, la somme de tous les brouillages est donnée par:

$$(C/I)_{rc}^{-1} \approx \frac{2\zeta(b)}{(2\varphi_{rc})^b}\left[\frac{a_1}{g_1 g_2} + \frac{a_4}{g_3 g_4}\right] + \frac{3\zeta(2)}{20\, g_1 g_2 \varphi_{rc}^2}\ ^{**} \tag{4}$$

Etant donné que, dans l'un et l'autre cas, le brouillage dans le système utile devrait être le même (pour une capacité égale à qualité de fonctionnement égale), on peut poser $(C/I)_c = (C/I)_{rc}$, ce qui permet d'établir entre φ_c et φ_{rc} la relation suivante:

$$(\varphi_{rc}/\varphi_c)^b \approx 2^{-b} + \varphi_{rc}^{b-2}\frac{0{,}1233}{(a_1 + a_4 g_1/g_4)\,\zeta(b)} \tag{5}$$

Lorsqu'il s'agit de systèmes assurant la même couverture, l'hypothèse *c)* ci-dessus donne des résultats trop pessimistes. En l'occurence, il convient de faire plutôt l'hypothèse suivante:

$$g_2(\delta) = g_2 = g'_3(\eta) = g'_3$$

Toutefois, pour la couverture commune, il faut prévoir davantage de brouillage entre réseaux afin de faciliter la coordination entre les stations terriennes. A cette fin, il semblerait approprié de prévoir que non pas 50%, comme dans le cas des couvertures distinctes, mais 90% du brouillage entre réseaux à assignations interverties soient imputables au brouillage entre stations terriennes. Dans cette hypothèse, on obtient la nouvelle formule:

$$(\varphi_{rc}/\varphi_c)^b = 2^{-b} + \varphi_{rc}^{b-2}\frac{0{,}617}{(a_1 + a_4 g_1/g_4)\, g_2\, \zeta(b)} \tag{5a}$$

qui fait apparaître le gain absolu des antennes de satellite. Pour réduire au minimum l'amélioration prévue dans l'utilisation de l'orbite, il convient de choisir pour g_2 la plus petite valeur raisonnable, qui correspondrait au gain au bord du faisceau d'un faisceau mondial: $g_2 = 40$ (16 dB).

Les formules (5) et (5a) peuvent être résolues pour le «rapport d'utilisation relative de l'orbite» φ_c/φ_{rc} en fonction de φ_c, les fréquences et les diagrammes d'antenne étant connus.

Si l'on considère deux types de diagrammes pour les antennes des stations terriennes, par exemple le diagramme de référence du CCIR pour lequel $a_1 = a_4 = 0{,}063$ et $b = 2{,}5$, et un diagramme fondé sur des conjectures optimistes, pour lequel $a_1 = a_4 = 0{,}016$ et $b = 3$; si, de plus, on admet $g_1/g_4 \approx f^2_{asc}/f^2_{desc} = 2{,}25$ (ce qui correspond aux paires de bandes 6/4 GHz, 15/10 GHz et 30/20 GHz), on obtient les deux courbes de la Fig. 1.

* $\zeta(b)$: fonction Zêta de Riemann.

** La quantité de brouillage fournie par les systèmes fonctionnant avec des assignations de fréquence intervertie a été incluse à deux reprises pour tenir compte de son égale répartition entre les stations terriennes.

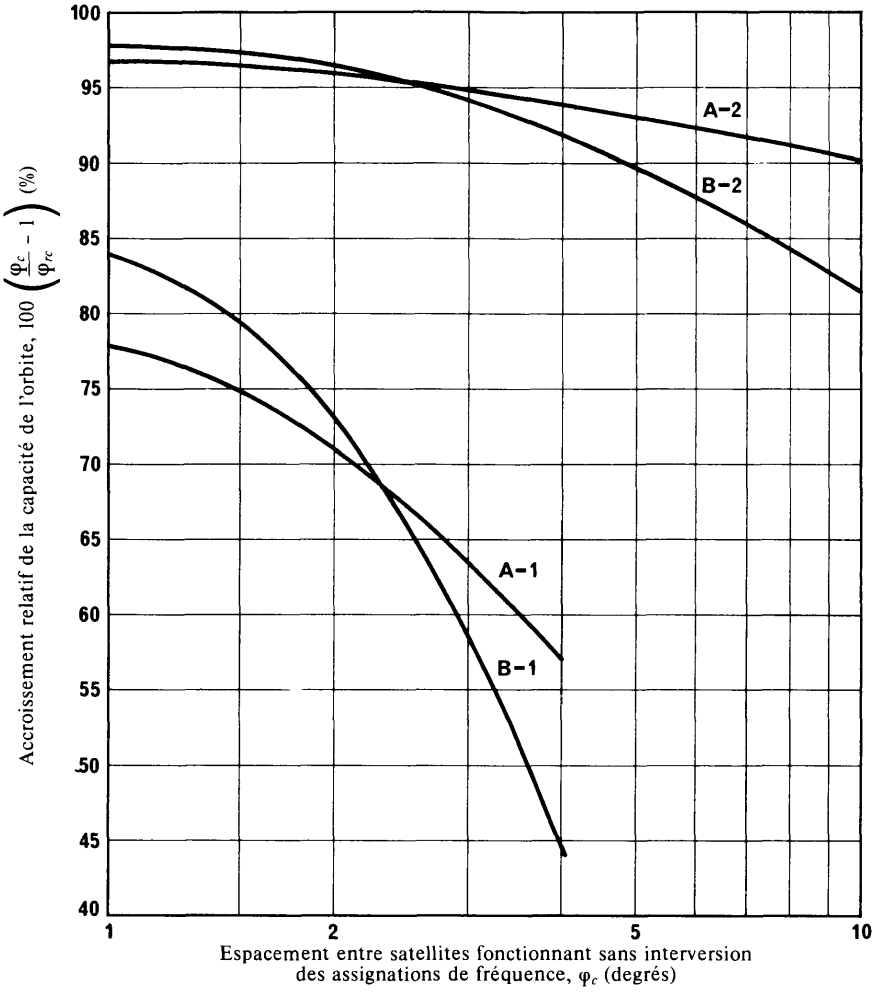


FIGURE 1 – *Accroissement de la capacité de l'orbite par l'utilisation de systèmes fonctionnant avec interversion des assignations de fréquence, par rapport à la capacité dans le cas de systèmes fonctionnant sans interversion*

Système A : a_1, a_4 = 0,063 ; b = 2,5

Système B : a_1, a_4 = 0,016 ; b = 3,0

Suffixe 1 : réseaux à couvertures distinctes

Suffixe 2 : réseaux assurant la même couverture

Il ressort de ce qui précède que l'application de la méthode d'interversion des assignations de fréquence à des satellites alternés contient la promesse d'un accroissement de la capacité de l'orbite beaucoup plus notable qu'avec l'utilisation d'assignations sans interversion, en particulier avec des paramètres de mise en service et d'exploitation qui permettent de maintenir des intervalles réduits entre les stations spatiales fonctionnant sans interversion des assignations de fréquence.

Le raisonnement précédent s'applique à l'utilisation d'une orbite homogène telle que spécifiée plus haut, on n'obtiendra peut-être pas le même avantage dans un cas hétérogène.

3. Brouillages entre stations spatiales occupant des positions situées sensiblement aux antipodes, avec des assignations de fréquence interverties

Les stations spatiales dont le faisceau d'antennes est étroit et la p.i.r.e. élevée sont susceptibles de se brouiller mutuellement lorsque leurs emplacements respectifs sont presque aux antipodes l'un de l'autre (Fig. 2).

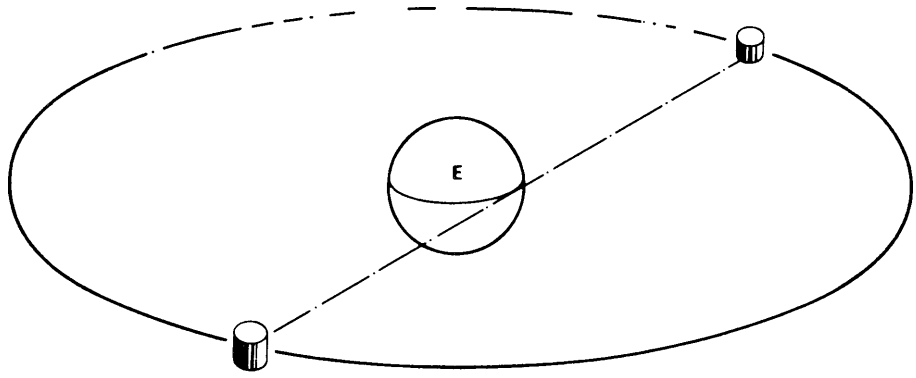


FIGURE 2 — *Géométrie de satellites situés presque aux antipodes*

E: Terre

Il convient, dans ce cas, d'adopter des critères appropriés pour le partage de fréquences afin d'éviter les brouillages mutuels.

On peut évaluer la puissance de brouillage entre deux stations spatiales situées approximativement aux antipodes l'une de l'autre de la manière suivante:

Si l'on désigne par g_a le gain de l'antenne de réception d'une station spatiale dans la direction du limbe équatorial de la Terre (c'est-à-dire en direction d'une station spatiale quasi-antipodale), et par e'_s la p.i.r.e. de la station spatiale située approximativement aux antipodes dans la direction du limbe de la Terre (c'est-à-dire en direction de la première station spatiale), la puissance de brouillage reçue est donnée par:

$$i = \frac{e'_s \, g_a}{l_a} \tag{6}$$

où l_a est l'affaiblissement en espace libre entre les deux stations spatiales situées aux antipodes:

$$l_a \approx 1{,}27 \, f^2 \times 10^{19} \tag{7}$$

f étant la fréquence exprimée en GHz.

Si l'on considère la puissance du bruit thermique à l'entrée du récepteur, $n = kT_RB$, où T_R est la température de bruit dans le système de réception, et B est la largeur de bande effective du récepteur, on peut admettre que T_R dépend de la fréquence. A la condition que la température de bruit du récepteur d'un engin spatial soit 1500 K à 6 GHz, on peut considérer que la température de bruit (en K) pour d'autres fréquences suit une loi en racine carrée:

$$T_R \, (f) = 1500 \, (f/6)^{0{,}5} = 612 \, f^{0{,}5} \qquad \text{K} \tag{8}$$

En outre, d'après les caractéristiques des signaux dans le service fixe par satellite, il semble indiqué d'utiliser une bande de référence large de 1 MHz pour le calcul du brouillage. On suggère donc que le terme e'_s de la formule (6) représente la p.i.r.e. (brouilleuse) dans une bande de 1 MHz et que la puissance de bruit thermique soit aussi normalisée pour 1 MHz.

Dans ces conditions, le rapport brouillage/bruit thermique dans une une bande de 1 MHz peut être exprimé par:

$$I/N = \frac{e'_s \, g_a}{l_a \, k \, T_R \, B} = \frac{e'_s \, g_a}{1{,}07 \, f^{2{,}5} \times 10^5} \tag{9}$$

Si l'on admet, de plus, que le bruit thermique sur la liaison montante d'un système de radiocommunications spatiales ne représente pas plus que le tiers du bruit total à l'intérieur du système, et que la valeur admissible de la puissance de brouillage soit d'environ le 1/20 de la puissance de bruit à l'intérieur du système, le rapport I/N ne devrait pas dépasser une valeur égale aux 3/20. Pour établir une relation entre la valeur admissible de la p.i.r.e. de la station spatiale brouilleuse, e'_s, dans une bande de 1 MHz, et le gain de l'antenne de la station spatiale brouillée, dans la direction du limbe équatorial de la Terre (point A ou point B dans la Fig. 3), la formule (9) peut donc être écrite:

$$e'_s \, g_a < 1{,}6 \, f^{2{,}5} \times 10^4 \tag{10}$$

La Fig. 4 montre la relation entre e'_s et g_a, pour plusieurs bandes de fréquences présentant de l'intérêt.

Lorsque ces bandes sont utilisées dans le sens espace vers Terre, en partage avec des services de Terre, les limites de la puissance surfacique déterminent les valeurs maximales de e'_s indiquées sur les courbes correspondant aux bandes des 4, 6, 12 et 20 GHz. Les valeurs de g_a qui correspondent à des valeurs de e'_s supérieures aux limites indiquées peuvent être utilisées sans inconvénient.

Lorsque les bandes dont il s'agit sont utilisées sur la liaison montante Terre vers espace, en partage avec des services de Terre, il n'est pas nécessaire que les valeurs admissibles de e'_s soient inférieures aux valeurs de la p.i.r.e. des stations d'émission de Terre; celles-ci sont indiquées dans le cas des bandes des 6, 12, 20 et 30 GHz. Les valeurs de g_a correspondant à des valeurs de e'_s supérieures à celles qui sont indiquées pour les émissions en provenance de stations de Terre peuvent être utilisées sans inconvénient.

Dans les bandes attribuées en exclusivité aux services spatiaux, il peut être nécessaire d'adopter des limites pour e'_s et g_a, afin de prévenir les brouillages entre stations spatiales situées approximativement aux antipodes.

Il convient de souligner que ces limites sont seulement applicables dans la direction des points A et B de la Fig. 3.

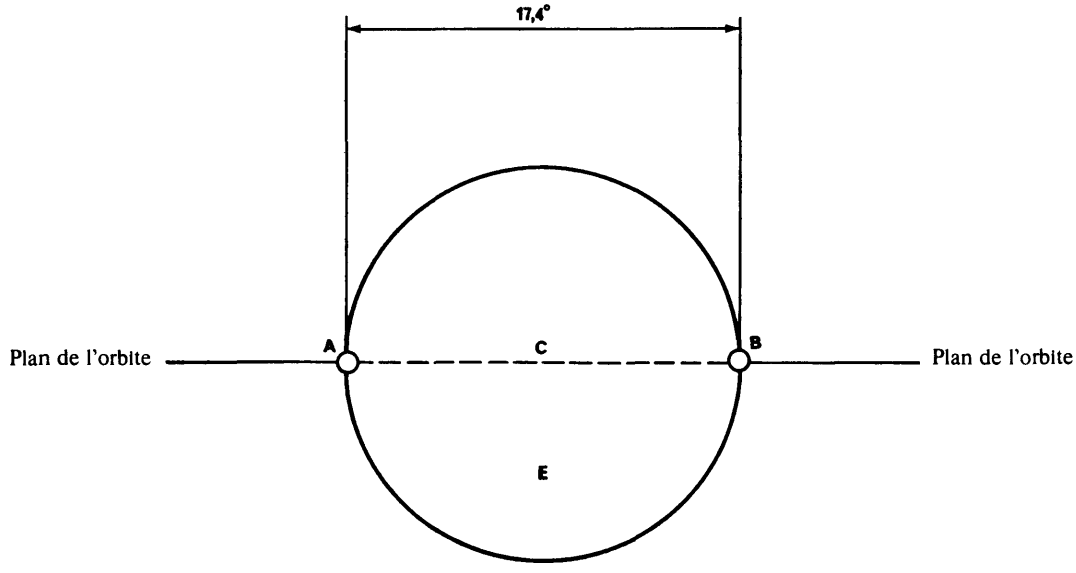


FIGURE 3 — *La Terre et l'orbite des satellites géostationnaires vues d'un satellite géostationnaire*

C: Equateur
E: Terre

4. Influence de l'utilisation «bidirectionnelle» de bandes de fréquences sur d'autres méthodes permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite

La discrimination de polarisation ou l'emploi d'antennes de satellite à faisceau étroit permet d'«isoler» des satellites du service fixe qui sont placés très près les uns des autres sur l'orbite et qui utilisent la même assignation de fréquence. Il serait possible de diminuer de moitié l'espacement minimal entre des satellites fonctionnant avec discrimination de polarisation, et de ramener cet espacement au tiers, ou même moins, en utilisant des antennes de satellite à faisceau ponctuel, ou en combinant ces deux techniques. L'inconvénient est que des méthodes de réutilisation des fréquences telles que la discrimination de polarisation introduisent une certaine hétérogénéité dans le système à satellites, ce qui pourrait réduire, voire supprimer complètement, l'amélioration de la capacité orbitale qui est rendue possible par l'exploitation avec assignation des bandes de fréquences interverties. On voit qu'une certaine méthode d'utilisation économique de l'orbite a tendance à annuler les avantages procurés par une autre méthode de cette nature. Cette tendance n'existerait pas si l'on utilisait, avec un même satellite, la discrimination de polarisation ou des antennes à faisceau ponctuel, pour la réutilisation des fréquences.

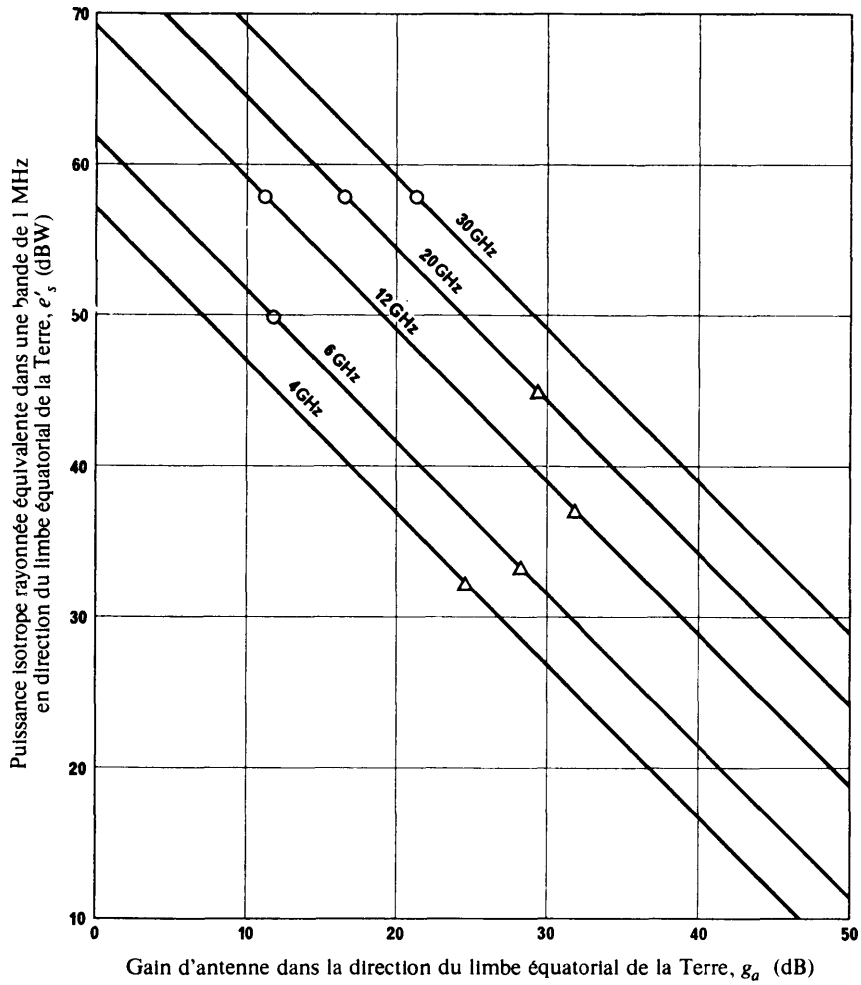


FIGURE 4 — *Relation entre les valeurs maximales admissibles de e'_s dans la direction du limbe équatorial de la Terre*

O Emissions de stations de Terre

Δ Limites de puissance surfacique

5. Brouillages entre stations terriennes dans le cas de l'utilisation d'assignations de fréquence interverties

La question de la distance nécessaire pour limiter le brouillage entre les stations terriennes qui utilisent des assignations de bandes de fréquences interverties est l'un des problèmes les plus importants qui se posent dans le secteur terrien. Lorsqu'il n'y a pas d'écran de terrain, on verra qu'il est possible de formuler la conclusion suivante: on estime qu'il faudrait prévoir un espacement compris entre 100 et 140 km environ, entre des stations terriennes des régions tempérées utilisant les mêmes bandes en sens opposé, si l'on veut que le bruit de brouillage par voie téléphonique, produit par cette source, soit limité la plupart du temps à 1000 pW. On pourrait peut-être admettre une distance de séparation plus petite pour des stations terriennes rayonnant sous de grands angles de site ou bénéficiant d'un bon effet d'écran du terrain. On prendra soin d'éviter le couplage entre stations terriennes qui peuvent être couplées dans la troposphère par un volume commun des lobes principaux.

Si elles optent pour l'inversion des assignations des bandes de fréquences, les administrations auront intérêt à fixer un sens de transmission préféré (à savoir, trajet descendant ou trajet montant) pour chaque bande utilisée de cette manière. Dans ces conditions, il sera hautement souhaitable que les stations terriennes dont les bandes de fréquences assignées ne correspondent pas au sens de transmission préféré soient implantées en des endroits où l'effet d'écran du terrain est efficace, cela afin de réduire à un minimum les brouillages mutuels avec les stations terriennes auxquelles on a assigné des bandes de fréquences correspondant au sens de transmission préféré.

6. Utilisation «bidirectionnelle» des bandes de fréquences partagées avec les services de Terre

L'utilisation, dans les bandes partagées avec les services de Terre, des assignations de bandes de fréquences interverties dans les services spatiaux conduirait à un certain nombre de sérieuses conséquences qu'il convient d'étudier. Le présent paragraphe expose certains des problèmes qui ne manqueront pas de se poser.

6.1 *Nouveaux problèmes concernant les services de Terre*

Dans les bandes partagées, les émetteurs des stations spatiales brouillent, dans de vastes zones, les récepteurs des services de Terre, cela dans les bandes utilisées pour les liaisons descendantes. Ce fait se traduit en particulier par des restrictions imposées aux systèmes de Terre qui devraient, de préférence, être orientés dans l'azimut de l'intersection de l'orbite des satellites géostationnaires et du plan de l'horizon. En outre, le Règlement des radiocommunications fixe, pour les liaisons montantes, des limites à la puissance d'émission et à la p.i.r.e. des stations de Terre. Si l'on adoptait l'exploitation avec interversion des assignations de bandes de fréquences dans les services de radiocommunications spatiales, ces deux inconvénients existeraient dans les services de Terre, dans toutes les bandes utilisées en partage.

Dans les bandes utilisées pour les liaisons montantes, les récepteurs des stations de terre voisines de stations terriennes sont sujets à des brouillages; comme il convient que les systèmes de Terre soient réalisés de telle sorte que ces brouillages soient réduits à des niveaux acceptables, on choisira avec soin l'emplacement des stations, ainsi que les fréquences qu'elles utilisent. Pour limiter ces brouillages, on procède également à une coordination de l'exploitation des deux services, des restrictions étant imposées aux services de Terre au voisinage des stations terriennes. Dans de nombreux cas, les effets de cette restriction seront réduits à un minimum, sur le plan géographique, si l'on groupe plusieurs stations terriennes en un même emplacement. Si l'on avait recours à l'interversion des assignations de bandes de fréquences dans les services de radiocommunications spatiales, il faudrait prévoir de grandes distances entre les stations terriennes pour limiter les brouillages entre celles-ci. Dans la plupart des cas, cela contribuerait à étendre considérablement les zones dans lesquelles des restrictions devraient être imposées aux services de Terre. De plus, la possibilité d'expansion des systèmes de Terre existant dans les zones en question (en mettant, par exemple, en service des bandes de fréquences supplémentaires inutilisées pour les liaisons montantes par le service de radiocommunications spatiales) pourrait être extrêmement réduite.

Enfin, la répartition du bruit dans les systèmes de Terre, pour le brouillage causé par les services de radiocommunications spatiales, devrait se faire entre deux éléments: brouillage causé par le satellite et brouillage causé par les émetteurs des stations terriennes. La répartition du bruit devrait encore s'effectuer en tenant compte de deux facteurs: les niveaux de brouillage et la proportion du temps pendant laquelle ces niveaux sont tolérables. Il en résulterait, soit des restrictions plus rigoureuses aux services de Terre au voisinage des stations terriennes, soit des critères de partage plus restrictifs.

6.2 *Nouveaux problèmes concernant les services de radiocommunications spatiales*

Le § 5 traite des brouillages entre stations terriennes utilisant des bandes de fréquences dans des sens opposés. La question se compliquerait dans les bandes partagées où il faudrait trouver, pour les stations terriennes, des emplacements convenables pour lesquels le brouillage causé par les services de Terre existants entre les émetteurs des stations terriennes et des stations spatiales – aspect déjà mentionné dans le § 6.1 – imposerait probablement une réduction de la puissance surfacique maximale admissible produite par les stations spatiales, ce qui pourrait avoir des conséquences économiques pour les futurs systèmes.

6.3 *Influence globale sur l'utilisation du spectre*

Il se peut que la meilleure utilisation du spectre que permet de prévoir l'application de cette technique au service de radiocommunications spatiales soit annulée par la réduction du spectre alloué au service de Terre. Il convient d'étudier la chose avec beaucoup de soin.

7. Conclusions

L'utilisation des mêmes bandes de fréquences respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante, dans le service fixe par satellite, peut conduire à un accroissement de la capacité de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre radioélectrique attribué à ces derniers. Cependant, en vue de contenir dans les limites tolérables les brouillages mutuels entre stations spatiales situées approximativement aux antipodes, il peut être nécessaire d'imposer des restrictions aux densités de puissance isotrope rayonnée équivalente ou aux gains d'antenne, ou même aux deux, dans des directions de l'orbite des satellites géostationnaires qui ne sont pas masquées par la Terre.

Dans les bandes de fréquences pour lesquelles des limites ont été imposées à la puissance surfacique produite par les émissions des stations spatiales, on pourrait faire usage de gains d'antenne de réception relativement élevés dans les stations spatiales employant des assignations de fréquence inverties sans qu'elles subissent un brouillage inacceptable. Dans le cas des bandes de fréquences partagées avec les services de Terre, les récepteurs des stations spatiales sont exposés aux brouillages causés par les émissions des stations de Terre et le gain des antennes de réception de ces stations spatiales ne peut pas être élevé dans des directions voisines des antipodes, mais, dans ces directions, la p.i.r.e. des émissions de stations spatiales sur des fréquences utilisées en sens opposé peut atteindre des valeurs appréciables.

Il existe cependant d'autres méthodes fort efficaces qui permettent d'économiser des fréquences et des positions orbitales: abaissement du niveau de rayonnement dans les lobes latéraux des antennes de station terrienne, discrimination de polarisation, utilisation de satellites dont les antennes fonctionnent avec une discrimination de direction; l'emploi de ces méthodes pourrait amoindrir l'avantage supplémentaire procuré par l'utilisation des mêmes bandes de fréquences sur les liaisons montante et descendante.

Par ailleurs, dans les bandes utilisées en partage avec les services de Terre, l'emploi des mêmes bandes de fréquences sur ces deux liaisons présenterait des inconvénients pour les deux services, en particulier:

- les services de Terre verraient leur p.i.r.e. et leur puissance d'émission limitées dans des bandes qui ne seraient pas utilisées par ailleurs sur les liaisons montantes des systèmes à satellites;
- les services de Terre pourraient être brouillés par des émissions des satellites dans des bandes de fréquences qui ne seraient pas utilisées par ailleurs sur les liaisons descendantes des systèmes à satellites;
- le développement et l'extension des services de Terre au voisinage des stations terriennes se trouveraient sérieusement limités;
- il pourrait être nécessaire de rendre les critères de partage plus restrictifs, en raison de l'apparition de nouveaux modes de brouillage.

En conclusion, l'utilisation de bandes de fréquences sur les liaisons montante et descendante est de nature à améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite; elle pourrait présenter un grand intérêt dans les bandes attribuées en exclusivité aux services de radiocommunications spatiales. Il y a lieu toutefois de poursuivre l'étude de ces problèmes.

RAPPORT 558-2

DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT D'ANTENNES DE SATELLITE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Les diagrammes de rayonnement des antennes de satellite jouent un rôle important pour l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, en particulier lorsque les faisceaux sont étroits. Etudiés et contrôlés avec soin, notamment en ce qui concerne les lobes latéraux, ces diagrammes de rayonnement peuvent contribuer à une meilleure utilisation de l'orbite. De plus, lorsqu'on manque de renseignements précis sur les caractéristiques d'une antenne, il faut pouvoir disposer d'un diagramme de rayonnement de référence pour appliquer les méthodes de calcul des niveaux de brouillage mutuel décrites dans l'Appendice 29 au Règlement des radiocommunications et dans les Rapports 454 et 455. Le présent Rapport contient une analyse préliminaire du problème que pose la définition du diagramme de rayonnement de référence et propose un modèle de diagramme provisoire qui devra être étudié plus à fond.

2. Considérations sur la construction des antennes de satellite

L'antenne d'un satellite fait partie intégrante d'une plate-forme dynamique dans un environnement spatial. La masse et la dimension sont des facteurs primordiaux, limités par l'enveloppe de la charge utile du lanceur. La stabilité de l'orientation de la plate-forme, l'inclinaison de l'orbite et les variations de la longitude introduisent des tolérances dont il faut tenir compte dans les diagrammes des antennes de satellite.

Certaines antennes de satellite doivent avoir des faisceaux dont les ondes rayonnées se caractérisent par une grande pureté de polarisation. Cet aspect de la réalisation des antennes est étudié dans le Rapport 555.

2.1 *Types d'antennes de satellite*

Le type particulier d'antenne utilisé dépend de la fréquence, de l'ouverture du faisceau et de l'enveloppe de la charge utile (dimension et masse) du lanceur. Les ouvertures de faisceau minimales dépendent de la précision avec laquelle l'attitude du satellite peut être stabilisée ainsi que des besoins du service à assurer en ce qui concerne, par exemple, la zone de couverture et la réutilisation des fréquences.

Les stabilités de pointage courantes pour des plates-formes d'antennes d'engins spatiaux sont d'environ ± 0,2°. A moins que le satellite ne comporte un système de poursuite, la stabilité du pointage limite le gain d'antenne à environ 50 dB dans l'axe. On ne peut obtenir des valeurs de gain plus élevées qu'en augmentant considérablement la complexité du satellite.

Aux fréquences supérieures à 1 GHz, on a utilisé jusqu'à maintenant des cornets pour les faisceaux larges et des réflecteurs paraboliques illuminés à partir du foyer pour les faisceaux étroits. Habituellement, des contraintes physiques obligent à passer d'un type d'antenne à l'autre, car la parabole illuminée à partir du foyer est beaucoup plus compacte pour une même dimension de l'ouverture. Ces deux types d'antennes ont été largement utilisés dans le passé, mais plusieurs engins spatiaux sont équipés d'un réflecteur à source décalée (par exemple, Intelsat IV-A et V) et certains prototypes sont dotés de lentilles à faisceaux multiples. A long terme, pour les systèmes AMRT, il pourrait y avoir intérêt à recourir à la commutation des faisceaux, en utilisant éventuellement des rideaux d'antennes en phase. Cela impliquerait que l'antenne du satellite rayonne un grand nombre de faisceaux très étroits et que l'orientation du faisceau puisse se faire avec une certaine souplesse afin de l'adapter aux nouveaux besoins concernant l'emplacement des stations terriennes.

2.2 *Diagramme du gain dans le lobe principal*

Théoriquement, il faudrait que le diagramme de rayonnement de l'antenne assure une concentration de l'énergie dans la direction des stations terriennes du réseau.

D'un point de vue pratique, il faudrait que le diagramme de rayonnement du faisceau de l'antenne d'un satellite assure une illumination uniforme de la zone de couverture et qu'il n'y ait aucune illumination en dehors de cette zone (Fig. 1). On peut réaliser un diagramme proche de cet objectif, mais il faudrait pour cela une antenne beaucoup plus grande et beaucoup plus lourde qu'une antenne simple ayant presque le même gain dans la zone de couverture. Pour une antenne simple, qui produit un rayonnement considérable hors de la zone de couverture, il convient également de prévoir une tolérance pour les erreurs d'attitude et de contrôle orbital. La Fig. 2 montre la variation du gain minimal dans la zone de couverture en fonction de la surface d'ouverture en supposant que le diagramme de rayonnement dans le faisceau principal soit de la forme de $(\sin^2 x)/x^2$. Il convient de noter qu'il existe une ouverture optimale de faisceau pour une zone de couverture donnée, à une fréquence donnée, mais cette ouverture peut varier entre 2,4 et 1 de part et d'autre de cette valeur optimale, alors que le gain minimal ne varie que de 0,5 dB. Un autre facteur qui pousse également à l'élargissement des faisceaux est la pente du gain à la limite de la zone à couvrir, laquelle croît dans le cas de faisceaux étroits. Ce facteur joue un rôle important, parce que l'instabilité de la plate-forme agit, conjointement avec la pente du gain, sur la stabilité des niveaux de puissance dans tout le réseau. Ainsi, on aura tendance à réduire la dimension et la masse de l'antenne et à définir une tolérance en matière d'erreurs d'attitude et de contrôle orbital en prévoyant une ouverture encore plus petite que la valeur optimale, correspondant à une surface d'ouverture relative inférieure à 1, comme le montre la Fig. 2.

En revanche, l'ouverture optimale d'une antenne fonctionnant dans une paire de bandes de fréquences est celle qui donne approximativement le même gain minimal dans les deux bandes, le but étant d'obtenir des gains minimaux aussi élevés que possible dans la zone de couverture. Ce gain minimal est inférieur de 0,5 dB environ à la valeur optimale indiquée dans la Fig. 2 pour une seule fréquence, quand le rapport des fréquences est égal à 1,5, ce qui est le cas pour les paires de bandes de fréquences 6/4 GHz et 30/20 GHz.

La largeur du faisceau étant liée à la fréquence, la fonction reliant le gain à la fréquence est analogue à la fonction reliant le gain à l'ouverture, représentée sur la Fig. 2. Il est possible d'obtenir de grandes largeurs de bande, avec de faibles variations de gain, aux environs du maximum de la fonction. Toutefois, ce facteur ne procure pas nécessairement un motif pour fonctionner dans cette région, puisqu'une régulation de la puissance peut compenser toute variation du gain en fonction de la fréquence.

Ainsi, un constructeur d'engins spatiaux sera tenté d'utiliser une antenne à petite ouverture ayant un faisceau large et à lente décroissance du gain hors de la zone de couverture. Or, une antenne de ce genre limitera l'utilisation de l'orbite. Il serait donc souhaitable de prévoir, en lieu et place de celle-ci, une antenne avec faisceau principal modelé.

Deux méthodes de modelage des diagrammes d'antenne sont à considérer tant du point de vue de l'augmentation du gain dans la zone de couverture que de la réduction du brouillage entre systèmes: 1) modelage pour épouser la forme de la zone (dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation); 2) modelage à l'intérieur de la zone (dans le plan de l'axe de propagation). On sera naturellement poussé à modeler le faisceau pour qu'il se conforme à la zone de couverture, dans la mesure où cela constitue le moyen le plus pratique et le plus économique d'obtenir une p.i.r.e. élevée en direction des stations terriennes de la zone de couverture.

On peut envisager de modeler un faisceau en vue de répartir uniformément l'énergie sur la surface de la zone à couvrir (voir la Fig. 1). La Fig. 3 représente les diagrammes théoriques d'une fonction en $(\sin^2 x)/x^2$ et de la somme de deux fonctions décalées en $(\sin^2 x)/x^2$ produisant une ondulation du gain de 3 dB. La valeur minimale du gain entre les points à 3 dB sera à peu près la même pour les deux diagrammes, mais la surface de l'ouverture nécessaire pour produire le faisceau modelé est d'un ordre de grandeur plus large et la pente du gain aux points à 3 dB est beaucoup plus accentuée.

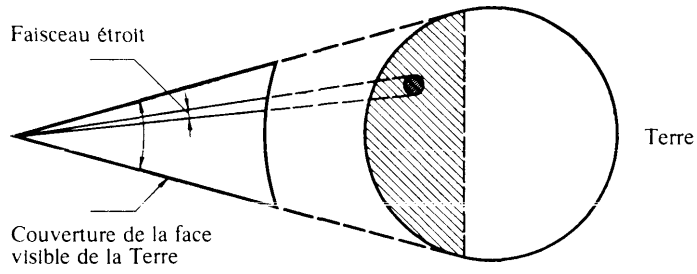
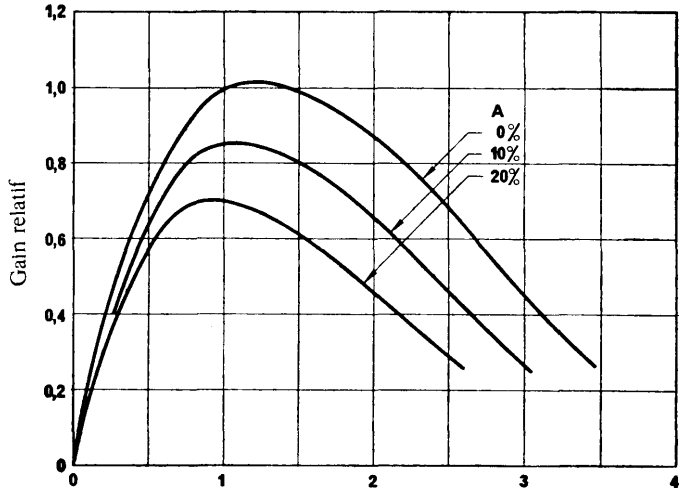


FIGURE 1 — *Configurations idéales des faisceaux d'antenne de satellite*



Rapport de la surface réelle de l'ouverture à la surface de l'ouverture pour la valeur requise de la largeur de faisceau à 3 dB avec une tolérance de 0%, 10%, 20%

FIGURE 2 — *Gain minimal dans la zone de couverture en fonction de la surface de l'ouverture*

A: Tolérance pour les erreurs de pointage de l'antenne, en pourcentage de la largeur du faisceau à 3 dB

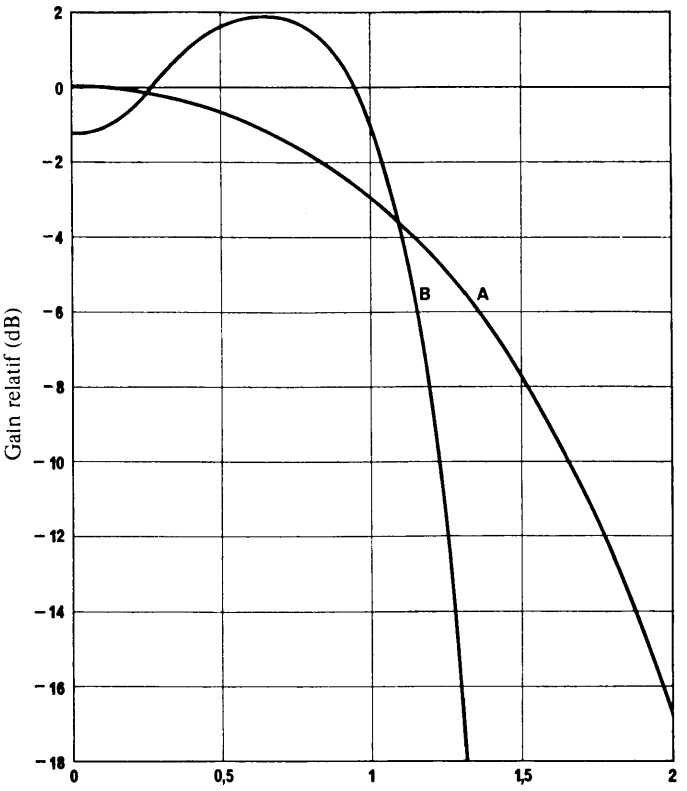


FIGURE 3 — *Faisceau modelé et faisceau classique*

A: Faisceau classique: $\frac{\sin^2 x}{x^2}$

B: Exemple de faisceau modelé

Note. — Dans la formule donnant le gain relatif du faisceau classique $\frac{\sin^2 x}{x^2}$, la variable x peut s'exprimer sous la forme $1{,}39\frac{\theta}{\theta_0}$ radians. Dans le cas où $\theta = \theta_0$, le gain relatif du faisceau classique: $\frac{\sin^2 1{,}39}{1{,}39^2} = 0{,}707^2 = 0{,}5$, ce qui correspond à – 3 dB.

Il y a eu récemment de nombreux travaux de recherche et de développement dans le domaine des antennes à faisceaux formés pour engins spatiaux. On a mis au point les structures suivantes: un réflecteur parabolique à sources multiples et une antenne-lentille à faisceaux multiples.

Le modelage du faisceau et la réalisation de faisceaux séparés à l'aide de plusieurs dispositifs d'alimentation sur un réflecteur parabolique commun ont été utilisés dans plusieurs engins spatiaux actuellement en exploitation. La Fig. 4 montre un exemple de diagramme obtenu en appliquant cette technique pour les satellites assurant la couverture des Etats-Unis d'Amérique. Les Fig. 5 et 6 donnent des exemples supplémentaires d'application de cette technique: couverture Palapa-B en Indonésie et couverture Anik-C au Canada. Elle présente beaucoup d'intérêt du point de vue du gain dans le lobe principal, puisque la perte de gain y est faible. La Fig. 7 indique la perte de gain dans le lobe principal en fonction de l'angle normalisé par rapport à l'axe. On a constaté qu'on peut décaler un faisceau de 1° d'ouverture à mi-puissance du centre vers la périphérie de la Terre, avec une perte de gain de 3 dB seulement. Cette technique peut être également utilisée pour modeler un faisceau à l'intérieur d'une zone de couverture, comme l'indique la Fig. 3. La puissance relative appliquée à chaque dispositif d'alimentation peut être réglée de façon que le diagramme du gain dans le lobe principal soit asymétrique. Un diagramme asymétrique, qui assure un gain maximal en direction des stations terriennes et une densité maximale de trafic, permet d'utiliser la p.i.r.e. plus efficacement. L'application de cette technique conduit à réaliser un grand nombre de formes différentes de diagrammes de lobe principal, dont on peut se servir dans la conception des systèmes pour obtenir une utilisation maximale de la p.i.r.e. (voir également l'Annexe II).

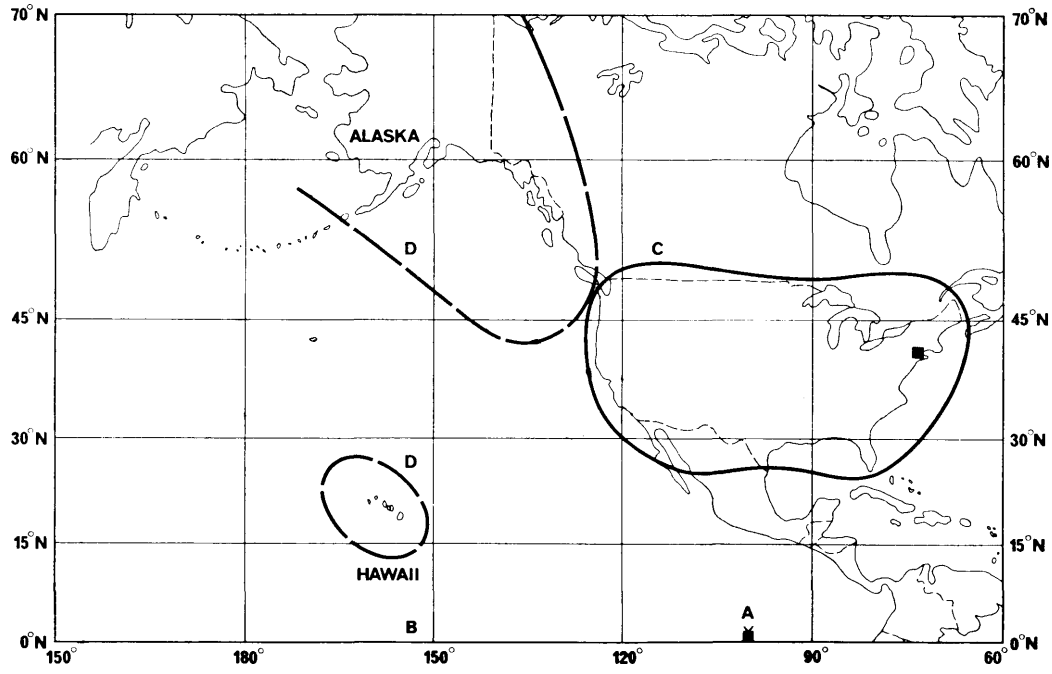
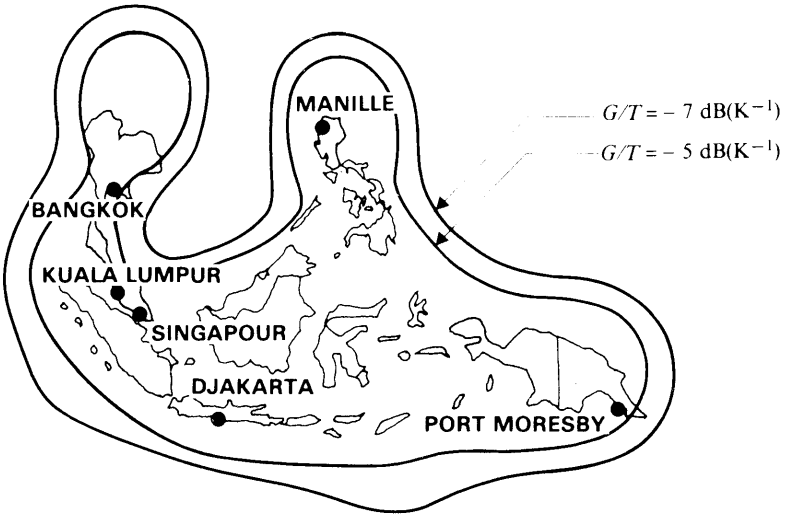


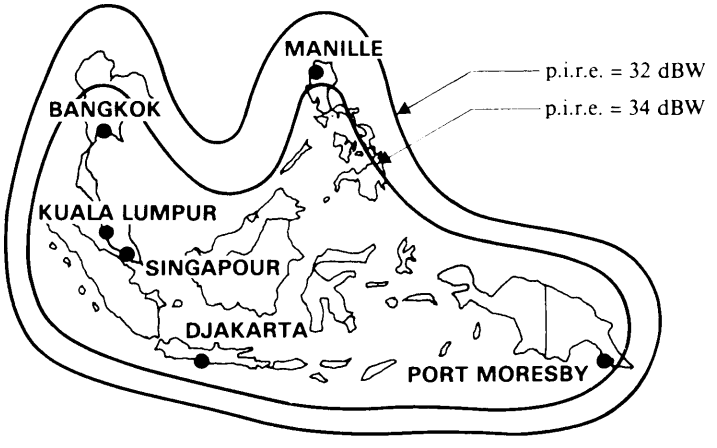
FIGURE 4 — *Exemples de contours des zones de couverture d'une antenne de satellite*

(Faisceau de 6,8° × 3,5° et faisceaux étroits circulaires de 2,8° rayonnés par une antenne de 1,5 m à plusieurs alimentations: le système fonctionne sur 4 GHz (liaison descendante) et 6 GHz (liaison montante))

A: satellite B: équateur C: faisceau de 6,8° × 3,5° D: faisceaux étroits circulaires de 2,8°

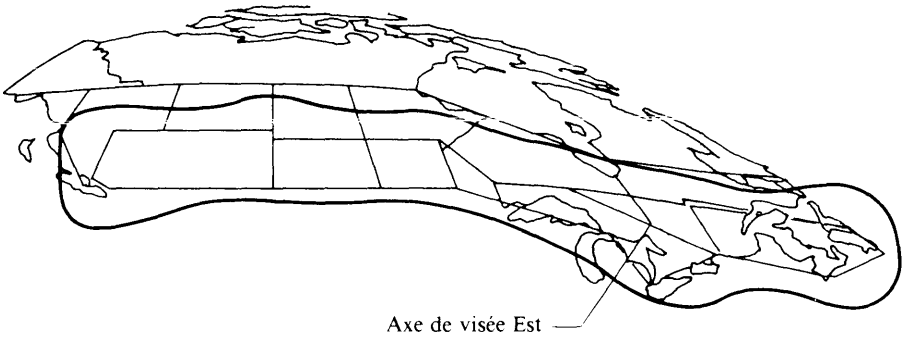


Réception

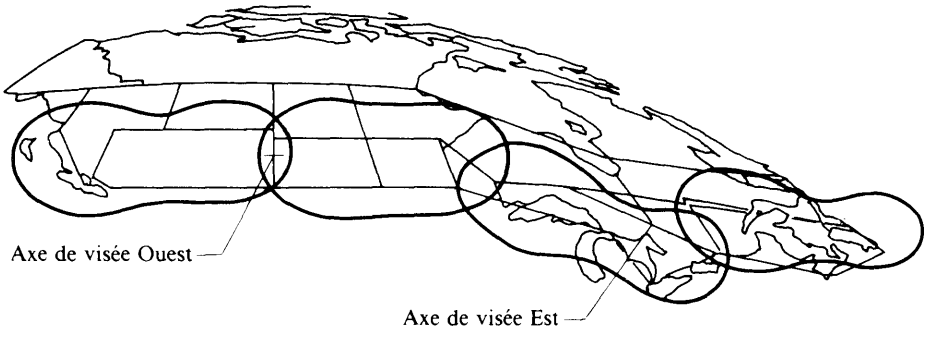


Emission

FIGURE 5 — *Couverture Palapa-B*



a) Faisceau de réception



b) Faisceau d'émission

FIGURE 6 — *Faisceaux Anik-C*

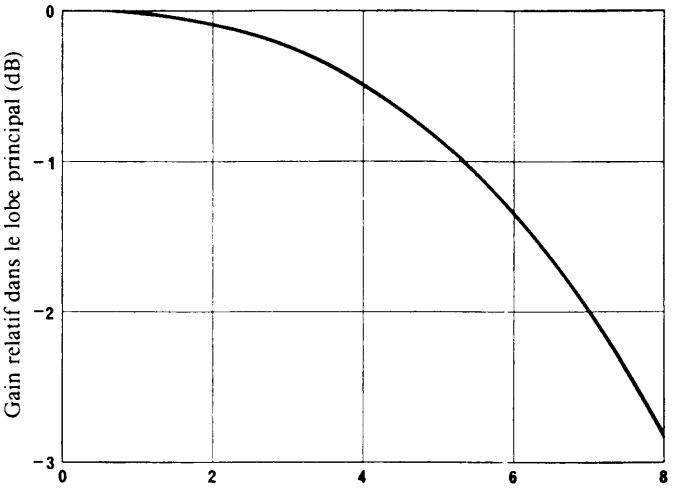


FIGURE 7 — *Gain dans le lobe principal en fonction de la position angulaire du lobe principal par rapport à l'axe focal*

Différence d'éclairement entre les bords et le centre: 20 dB, $f/D = 1$

En outre, les antennes à faisceaux multiples avec réflecteur peuvent présenter de l'intérêt: simplicité de réalisation, grande largeur de bande, facilité de construction, faible poids et coût modique. Toutefois, des études ont démontré que les grandes antennes usuelles à faisceaux multiples introduisent un effet de masque excessif, d'où des niveaux élevés dans les lobes latéraux de toutes les structures, sauf celles qui sont du type à source décalée.

On peut également réaliser des antennes à faisceaux multiples en focalisant, à l'aide d'une lentille à micro-ondes, l'énergie fournie par un réseau primaire de cornets d'alimentation. La symétrie axiale d'une telle structure permet d'obtenir une faible aberration pour les faisceaux d'exploration, ce qui se traduit par des valeurs plus faibles dans les lobes latéraux et par un meilleur découplage des faisceaux que dans le cas des antennes à faisceaux multiples avec réflecteur; c'est là une considération importante pour la réutilisation des fréquences.

De plus, on peut utiliser un réseau conformateur de faisceaux, soit avec un réflecteur soit avec une antenne-lentille pour produire une grande variété d'empreintes à illumination ponctuelle sur la Terre. On obtiendra ainsi une empreinte dont le contour est modelé spécialement pour pouvoir épouser la forme de presque toutes les zones de service géographique voulues; cette empreinte est constituée par un ensemble de points d'illumination. Parallèlement à la fabrication des prototypes de lentilles, on a mis au point des techniques d'informatique qui permettent de calculer les caractéristiques de phase et d'amplitude optimales du réseau conformateur de faisceaux. Ces techniques permettent de faire varier la forme des faisceaux à partir du sol.

En ce qui concerne donc les diagrammes simples, des considérations concernant le gain dans le lobe principal conduisent à concevoir des antennes de satellite dont l'emploi peut avoir pour résultat une mauvaise utilisation de l'orbite. Toutefois, lorsque les dimensions et la masse de l'antenne sont très petites par rapport aux dimensions et à la masse totales du satellite, l'emploi d'un faisceau modelé peut présenter de l'intérêt du point de vue de la construction d'un système. L'Annexe I montre qu'il est possible d'employer un faisceau mis en forme pour des antennes à couverture globale.

A titre d'exemple de modelage de faisceau, une antenne à faisceau étroit et à réflecteur en cornet stabilisé par contre-rotation mécanique a été utilisée par le Japon dans le satellite expérimental de communication japonais de capacité moyenne. La Fig. 8 représente l'empreinte d'émission du satellite dans la bande des 20 GHz (19,45 GHz).

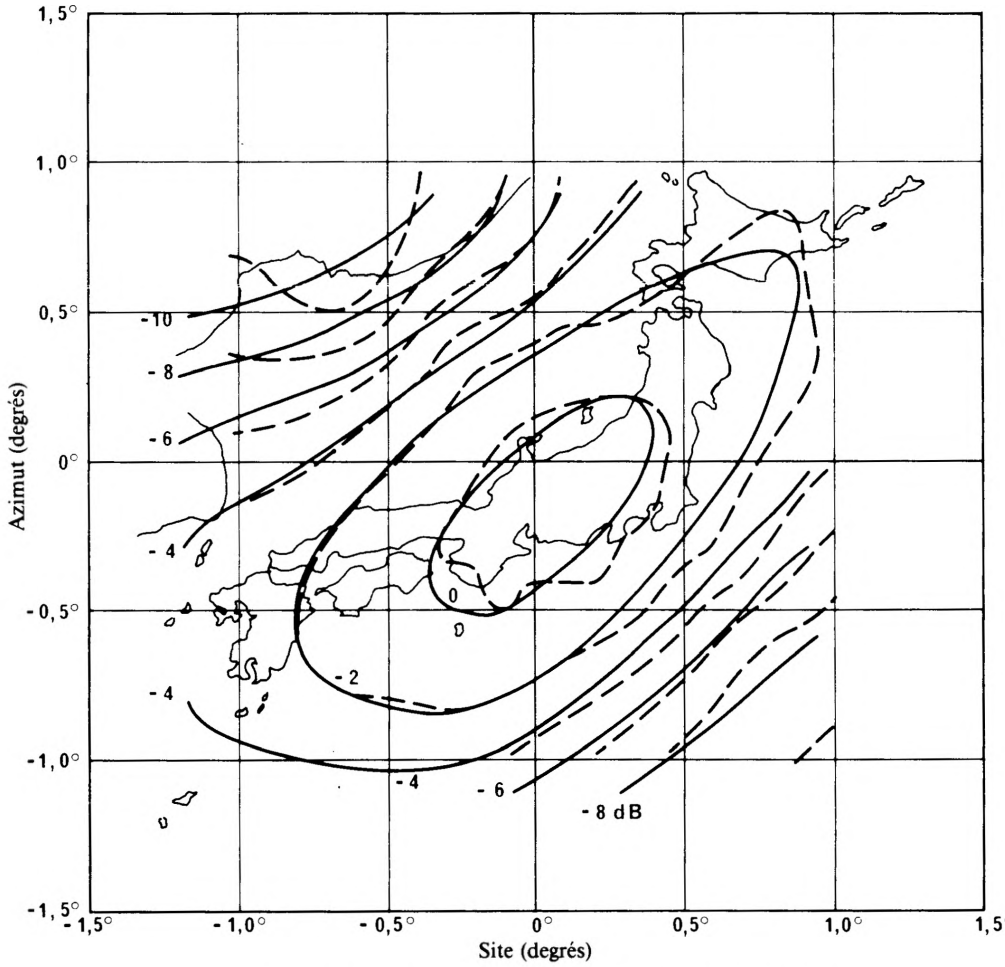


FIGURE 8 — *Empreinte d'émission du satellite dans la bande des 20 GHz (19,45 GHz)*

——— Contours mesurés en orbite

— — — — Contours mesurés au sol

2.3 *Diagrammes du gain des lobes latéraux*

Les diagrammes de rayonnement des lobes latéraux ont une influence notable sur la capacité de l'orbite et la réduction des brouillages. La formation de lobes latéraux découle de certaines caractéristiques de construction du système d'antenne, y compris la diffraction et le débordement autour des bords d'un réflecteur principal ou d'un réflecteur secondaire, l'effet de masque dans l'ouverture et la distribution de l'amplitude et de la phase dans l'ouverture ainsi que le décalage des dispositifs d'alimentation par rapport au foyer. L'effet de masque dans l'ouverture peut constituer un facteur limitatif dans les systèmes à réflecteur, si le rapport D/λ est petit. La distribution de l'amplitude et de la phase dans l'ouverture joue un rôle important dans tous les types d'antenne. A mesure que l'on fait varier l'éclairement de l'ouverture, depuis une distribution uniforme jusqu'à une distribution où l'éclairement décroît davantage sur les bords de l'ouverture, la valeur de crête décroît légèrement et les lobes latéraux sont notablement réduits lorsque l'effet de masque n'intervient pas. Cet effet est représenté graphiquement par la Fig. 9.

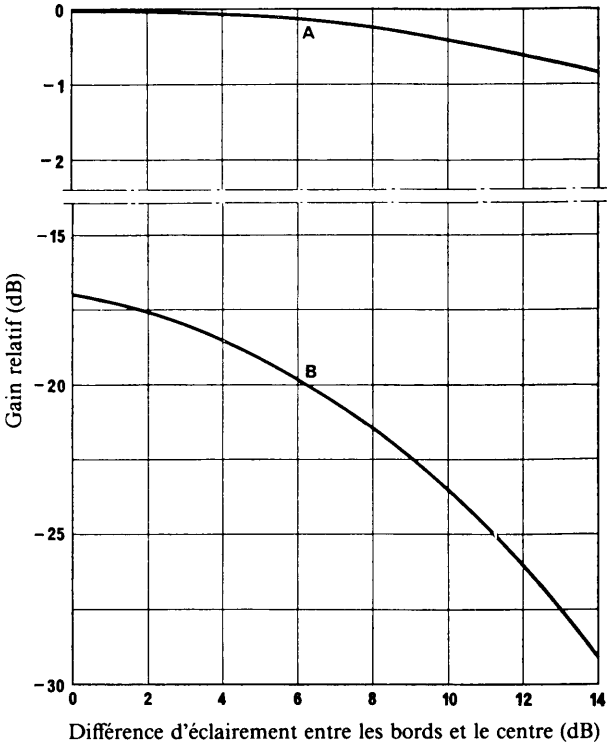


FIGURE 9 — *Influence de l'éclairement de l'ouverture*

A: lobe principal
B: premier lobe latéral

Pour des réflecteurs paraboliques illuminés à partir du foyer par une source unique, et dont le niveau d'éclairement vers le bord du réflecteur est de 10 dB inférieur à celui vers le centre et dont le rapport D/λ est approximativement 10, le niveau relatif du premier lobe latéral est d'environ -20 dB par rapport au gain dans l'axe du lobe principal. A mesure que le rapport D/λ croît, le niveau relatif du premier lobe latéral décroît jusqu'à environ -25 dB par rapport au gain dans l'axe principal. L'effet de masque dans l'ouverture a pour conséquence une augmentation du niveau dans les lobes latéraux pour de faibles valeurs du rapport D/λ. Dans le cas de réflecteurs paraboliques illuminés à partir du foyer, pour assurer la couverture de la face visible de la Terre ($D/\lambda \approx 4$), le niveau dans le premier lobe latéral serait d'environ -15 dB par rapport au gain dans l'axe principal. Faire décroître l'illumination sur les bords ne réduit pas le niveau des lobes latéraux proches lorsque l'effet de masque dans l'ouverture est le facteur limitatif. Il est vraisemblable que, pour obtenir de faibles niveaux des lobes latéraux, on devra utiliser des antennes dont l'effet de masque dans l'ouverture ne sera pas important, ce qui conduira à des configurations asymétriques qui pourront avoir des inconvénients dans d'autres domaines.

Il convient aussi de considérer la pente de l'enveloppe des lobes latéraux. Pour des antennes de types autres que les cornets, si l'on ne prête pas une attention spéciale à la réduction des lobes latéraux, la pente est en général d'environ $-7{,}5$ dB par octave d'angle par rapport à l'axe principal. Dans le cas de cornets sans réflecteur, la pente est, plus typiquement, d'environ -9 dB par octave.

Si l'on insiste pour que le niveau des lobes latéraux soit bas, il semble qu'il soit possible d'obtenir des niveaux de -30 dB par rapport au gain dans l'axe principal dans le premier lobe latéral et des pentes d'enveloppe de lobes latéraux de -12 dB par octave. Ces valeurs sont en général obtenues avec des antennes qui ne présentent pour ainsi dire pas d'effet de masque dans l'ouverture et dont les caractéristiques à d'autres égards doivent être étudiées avant de pouvoir tirer des conclusions.

Pour les systèmes munis d'un réflecteur parabolique à plusieurs alimentations, le niveau des lobes latéraux augmente lorsqu'on décale le lobe principal. Lorsque ce décalage augmente, les niveaux des lobes latéraux situés du côté de l'axe (lobes latéraux en «coma») s'élèvent tandis que les lobes opposés ont tendance à fusionner avec le lobe principal. Le lobe latéral en coma a tendance à augmenter moins rapidement lorsque l'éclairement est beaucoup diminué sur les bords ou bien lorsqu'on utilise un rapport f/D élevé. La Fig. 10 montre la variation du niveau du premier lobe latéral en coma en fonction de l'angle normalisé par rapport à l'axe pour $f/D = 1$ et pour une variation d'éclairement de 20 dB entre les bords et le centre. La position angulaire relative du premier lobe en coma coïncide à peu près avec celle du premier lobe latéral normal. Par conséquent, si on utilise plusieurs dispositifs d'alimentation pour obtenir des lobes principaux de formes complexes (angles de décalage de l'ordre d'une couverture de faisceau), certains lobes en coma peuvent se trouver à l'intérieur de la zone de couverture. Lorsque des faisceaux séparés sont rayonnés par plusieurs dispositifs d'alimentation, les lobes latéraux en coma peuvent se trouver dans la zone de couverture d'autres systèmes à satellites.

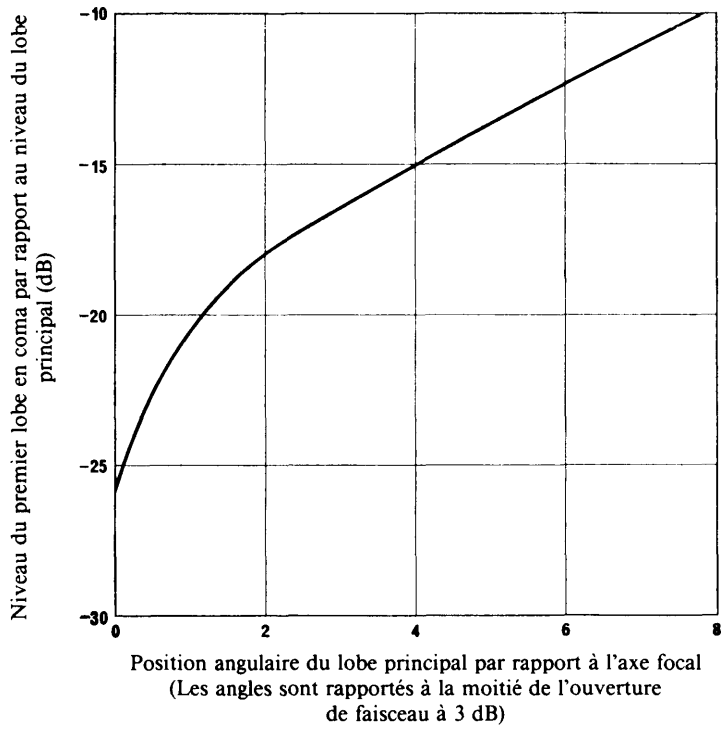


FIGURE 10 — *Niveau du premier lobe en coma en fonction de l'angle du lobe principal par rapport à l'axe focal*

Différence d'éclairement entre les bords et le centre:
20 dB $f/D = 1$

La formation de lobes latéraux en coma est la caractéristique fondamentale des antennes munies d'un réflecteur parabolique à alimentation décalée par rapport au foyer et, de ce fait, le niveau des lobes latéraux peut être élevé. Plusieurs alimentations sur l'ouverture d'un réflecteur commun augmentent également l'effet de masque dans l'ouverture, ce qui élève le niveau des lobes latéraux proches.

Le modelage du faisceau peut aussi être réalisé avec des réseaux d'antennes. La couverture angulaire requise étant relativement petite, on peut utiliser plusieurs éléments à gain élevé. La présence de lobes diffractés par le réseau dans la région des lobes latéraux peut toutefois constituer un inconvénient important.

Comme on l'a indiqué précédemment, le degré de polarisation qui peut être maintenu dans la région des lobes latéraux n'est pas déterminé avec certitude actuellement et cette question doit être encore étudiée.

La Fig. 11 illustre par un exemple les caractéristiques de gain dans les lobes latéraux d'une antenne à faisceau étroit modelé, fonctionnant dans deux paires de bandes de fréquences [Shinji et autres, 1974]. Les diagrammes d'enveloppe des lobes latéraux dans le plan d'azimut, rapportés à la distance angulaire entre l'axe du faisceau et le contour du gain minimal, sont représentés sur la Fig. 11 pour chaque fréquence. Pour plus de renseignements sur les niveaux des lobes latéraux, voir le Rapport 390. Les Annexes II et III contiennent des exemples des caractéristiques de gain dans les lobes latéraux.

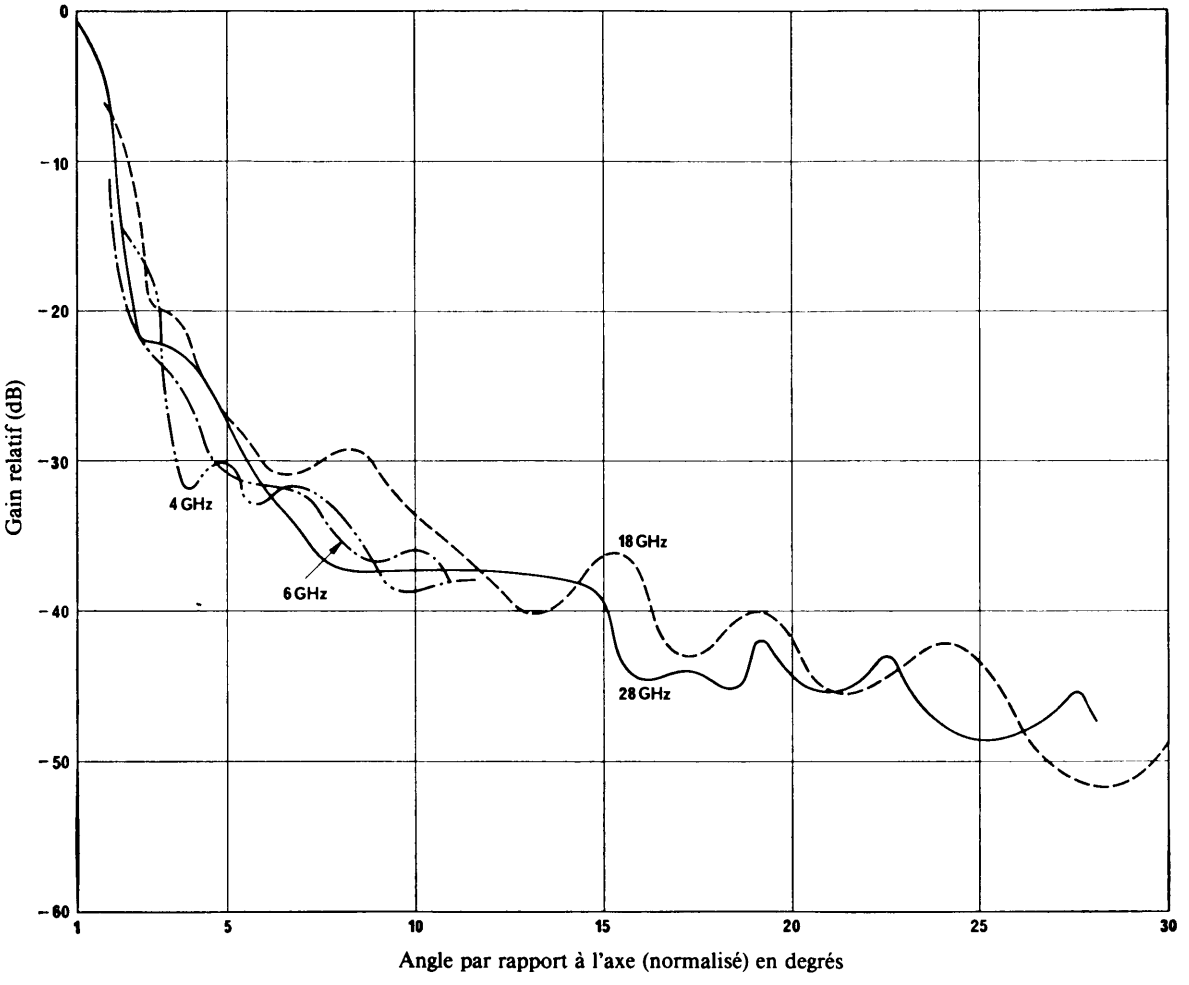


FIGURE 11 — *Caractéristiques de gain mesurés de l'enveloppe des lobes latéraux d'une antenne à réflecteur en cornet avec faisceau étroit modelé*

	Fréquence	Polarisation	Angle de référence	
———	28,3 GHz	circulaire (G)	1,0°	voir la Fig. 6a)
– – – –	18,3 GHz	circulaire (D)	1,0°	
—·—·—	6 GHz	circulaire (G)	2,7°	voir la Fig. 6b)
—··—··	4 GHz	circulaire (D)	2,7°	

Note. — Les angles par rapport à l'axe sont rapportés à l'origine de la Fig. 6 ; ils sont contenus dans le plan passant par les points (a) et (b) de la Fig. 6.

3. Utilisation de l'orbite

3.1 *Influence des enveloppes des lobes latéraux*

Pour améliorer l'utilisation de l'orbite, il faut, en définitive, réduire le gain dans le lobe principal ou augmenter les dimensions de l'ouverture, ou même appliquer les deux méthodes à la fois. Les effets de l'application de la première méthode sont représentés graphiquement par la Fig. 9. A une diminution de l'illumination des bords correspond une réduction du niveau du premier lobe latéral et une augmentation de la pente de l'enveloppe des lobes latéraux. Toutefois, la position relative des lobes latéraux proches ne subit pas de modification notable. La Fig. 12 représente l'amélioration relative de l'utilisation de l'orbite à mesure que décroît le niveau de l'enveloppe des lobes latéraux. (On fait l'hypothèse d'un système homogène, dans lequel les antennes de satellites rayonnent des faisceaux étroits à symétrie de révolution dont la pente de l'enveloppe des lobes latéraux est $-7{,}5$ dB par octave.) On suppose qu'un certain nombre de faisceaux étroits sont formés en un point de l'orbite des satellites géostationnaires (sans faire de discrimination dans les stations terriennes); le nombre relatif de faisceaux qui peuvent être formés pour un niveau de brouillage donné est alors calculé en fonction du niveau dans l'enveloppe des lobes latéraux. Des améliorations de l'enveloppe des lobes latéraux, même relativement minimes, ont des conséquences notables sur l'utilisation de l'orbite.

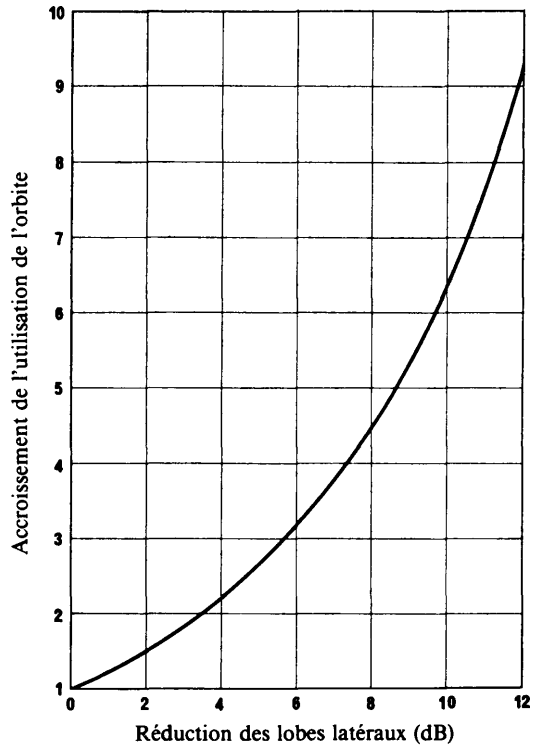


FIGURE 12 — *Influence du niveau des lobes latéraux sur l'utilisation de l'orbite*

L'augmentation des dimensions de l'ouverture a pour effet de réduire l'angle par rapport à l'axe dans lequel se produisent les crêtes des lobes secondaires, même si aucune amélioration ne peut être apportée aux niveaux des lobes latéraux. La Fig. 2 montre qu'il y a une gamme assez large de dimensions d'ouvertures dans laquelle la valeur minimale du gain d'antenne dans l'étendue d'une zone donnée n'est pas notablement modifiée lorsque les faisceaux ne sont pas modelés. Si l'on utilise des faisceaux modelés, on augmente les dimensions de l'ouverture. En première approximation, l'amélioration relative de l'utilisation de l'orbite varie en raison directe de l'accroissement de la surface de l'ouverture, les hypothèses étant les mêmes que plus haut.

Ces améliorations partent de l'hypothèse d'une pente de l'enveloppe des lobes latéraux de $-7{,}5$ dB par octave. Cependant, une fonction qui s'adapte à l'enveloppe des lobes latéraux éloignés est généralement pessimiste pour la région du premier lobe latéral qui présente ordinairement plus d'importance du point de vue du partage des fréquences. Une fonction typique de l'enveloppe des lobes latéraux les plus éloignés du faisceau principal est représentée graphiquement sur la Fig. 13 par la courbe E.

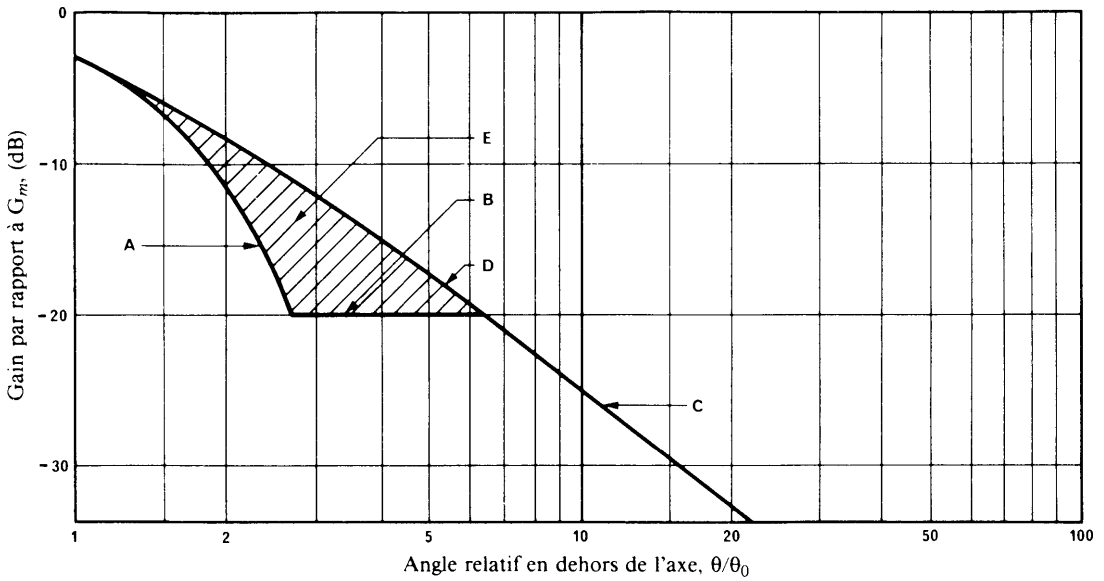


FIGURE 13 — *Fonctions de l'enveloppe du diagramme de rayonnement*

θ_1 : valeur de θ lorsque $G(\theta)$ dans (C) est égal à - 10 dB
[Lorsque θ dépasse θ_1, $G(\theta)$ ne devrait pas être supérieur à -10 dB]

Courbes A: $[G(\theta) - G_m] = -3 \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2$ dB pour $(0_0 \leq 0 \leq 2{,}6\ 0_0)$

B: $[G(0) - G_m] = -20$ dB pour $(2{,}6\ 0_0 < \theta \leq 6{,}3\ 0_0)$

C: $[G(0) - G_m] = -25 \log \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)$ dB pour $(6{,}3\ 0_0 < \theta \leq 0_1)$

D: $\left[1 + \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{2.5}\right]^{-1}$

E : Zone du premier lobe latéral

G_m : gain maximal dans le lobe principal

0_0 : moitié de l'ouverture de faisceau à 3 dB dans le plan considéré (3 dB au-dessous de G_m)

Cette courbe est au-dessus du niveau relatif −20 dB dans la région des premiers lobes latéraux. Cette valeur est typique pour des antennes simples sans modelage du faisceau. La gamme des angles dans laquelle le niveau dans les lobes latéraux est généralement inférieur à celui qui est donné par la fonction de référence ci-dessus est au plus dans le rapport de 3 à 1.

Cette zone peut être très importante, si l'on considère la gamme des largeurs de faisceau des antennes des satellites et des stations terriennes.

En général, les largeurs de faisceau des satellites rentrent dans l'une des trois catégories suivantes:

- faisceaux dont la largeur est d'environ 17° (couverture de la face visible de la Terre);
- faisceaux dont la largeur est comprise entre 17° environ et 5 à 10° environ;
- faisceaux considérablement plus étroits que ce qui est nécessaire pour la couverture de la face visible de la Terre.

Lorsqu'il s'agit d'assurer la couverture du globe terrestre tout entier, le lobe principal couvre la face de la Terre visible du satellite et même un peu au-delà sans que les lobes latéraux soient dirigés vers la Terre. Au-delà des limites de la Terre, telles que les voit un satellite, on a seulement à considérer le brouillage pouvant être causé aux émissions d'un satellite fonctionnant avec des fréquences inversées; par exemple, un satellite émettant dans la bande des 6 GHz et recevant dans la bande des 4 GHz. La Fig. 14 représente des caractéristiques typiques de gain, mesurées pour les antennes à couverture mondiale des satellites Intelsat-IV et IV-A, dont l'ouverture angulaire est bien plus grande que le diamètre de la Terre.

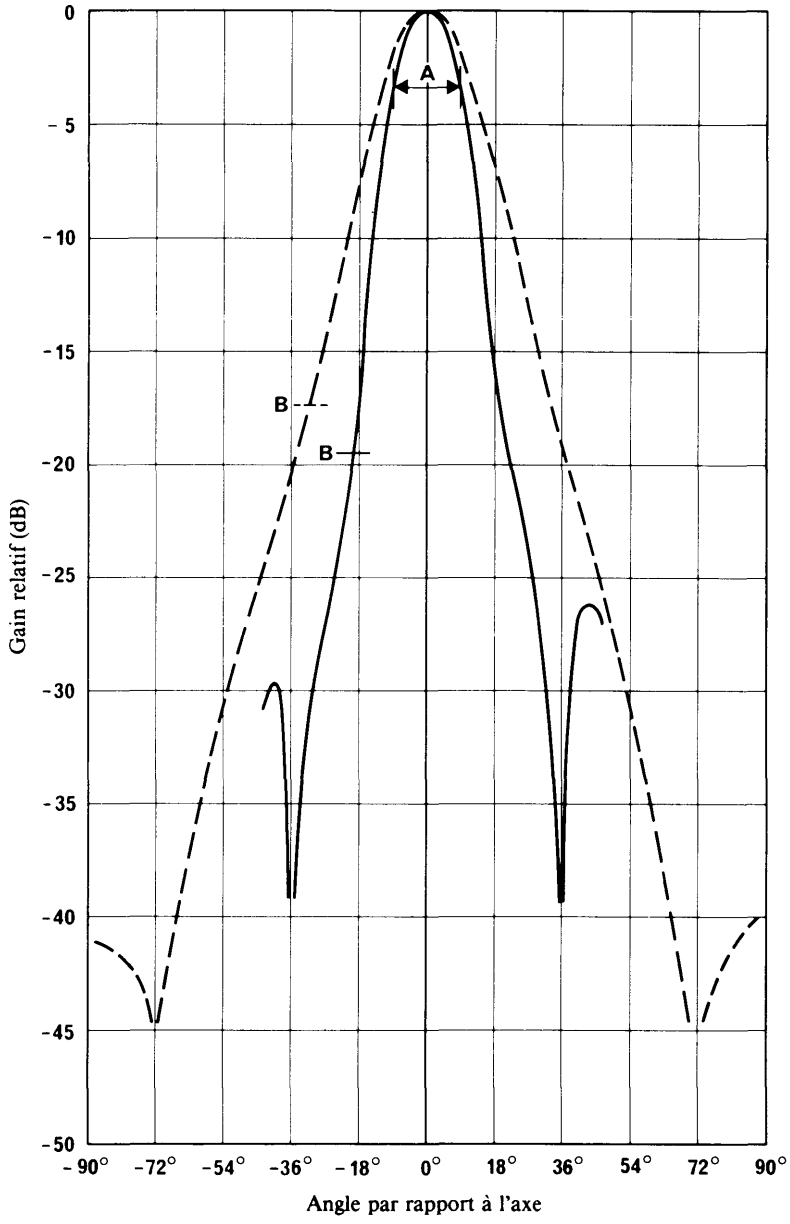


FIGURE 14 — *Antennes de satellite à polarisation circulaire, à couverture mondiale. Diagrammes types mesurés f = 3950 MHz*

——— Intelsat-IV cornet conique avec réflecteur plat 45°

– – – – cornet conique multimode pour utilisation sur Intelsat-IVA

A: angle au pourtour de la Terre telle qu'elle est vue depuis un satellite géostationnaire

B: cas des niveaux isotropes

Dans le deuxième cas, le lobe principal et le premier lobe latéral constituent la source principale du brouillage causé aux stations terriennes, et, dans le troisième cas, les lobes latéraux d'ordre supérieur sont également des sources de brouillage pour les stations terriennes.

Lorsque la zone couverte par les antennes de satellite est moindre que la face visible de la Terre, il faut tenir compte des diagrammes d'antenne des stations terriennes dans l'évaluation de l'utilisation de l'orbite. Dans l'hypothèse restrictive où des satellites adjacents couvrent des zones terrestres adjacentes, deux conditions peuvent être posées: 1) le rapport D/λ des antennes des stations terriennes est considérablement plus grand que celui des antennes des satellites, et 2) le rapport D/λ des stations terriennes est comparable ou inférieur à celui des antennes des satellites. Dans le premier cas, les antennes des stations terriennes assurent la plus grande partie de la discrimination. Le fonctionnement est tout à fait possible avec chevauchement du premier lobe latéral du satellite. Dans le second cas, les antennes des stations terriennes n'assurent qu'une faible partie de la discrimination; la zone du premier lobe latéral des antennes de satellite peut jouer également un rôle important. Un niveau inférieur ou égal à -30 dB dans les lobes latéraux proches pourrait permettre d'augmenter très sensiblement l'efficacité d'utilisation de l'orbite lorsque le rapport D/λ de l'antenne du satellite est comparable ou supérieur au rapport D/λ de l'antenne de la station terrienne. Ce niveau peut être obtenu avec certains types d'antennes.

3.2 *Orientabilité des antennes à faisceau étroit*

Un autre facteur à prendre en considération dans la conception des satellites pourvus d'antennes à faisceau étroit est l'orientabilité de ces antennes. On prévoit que, à mesure qu'augmentera la densité d'occupation de l'orbite par les satellites, il pourra être nécessaire de déplacer des satellites qui s'y trouvent afin d'en placer de nouveaux sur l'orbite. Les possibilités qui s'offrent de déplacer un satellite risquent d'être fort limitées si l'angle que forme le faisceau de son antenne avec la plate-forme du satellite est fixe. L'arc de l'orbite des satellites géostationnaires que l'on peut utiliser pour un système donné est limité par les impératifs de la visibilité directe, mais il ne faut pas que les limites d'orientabilité des antennes de satellite à faisceau étroit restreignent exagérément la valeur de cet arc.

3.3 *Considérations générales de conception*

Le type le plus simple de faisceau d'antenne est le faisceau à section transversale circulaire ou elliptique. L'empreinte d'un tel faisceau sur le sol sera en forme d'ellipse distordue, la distorsion augmentant à mesure que la zone de service s'éloigne du point de projection du satellite. Pour une section transversale donnée de faisceau d'antenne, la position du satellite par rapport à la zone de couverture détermine les dimensions et la forme de celle-ci. Dans certains cas, on peut parvenir à un certain modelage du faisceau en modifiant la forme du réflecteur ou des cornets d'alimentation, mais cela peut avoir des effets non désirés sur le rendement de l'antenne et les niveaux des lobes latéraux. Cependant, comme l'indique clairement l'exemple de la Fig. 15, la couverture par faisceau modelé est plus efficace que la couverture par faisceau elliptique. Les rayonnements tombant dans la partie hachurée représentent un gaspillage d'énergie.

Lors de la planification d'un faisceau modelé, un facteur important est que le cercle de courbure minimum coïncide avec le contour réel d'une partie de la zone de couverture (voir la Fig. 15). Le cercle (ou l'ellipse) minimal détermine les dimensions du réflecteur de l'antenne du satellite, ainsi que certains facteurs significatifs tels que le gain de l'antenne, les besoins de puissance en continu et de puissance radioélectrique et, parfois, les dimensions minimales de l'engin spatial. Ces facteurs peuvent à leur tour influer sur le coût de l'engin spatial et de son lanceur.

Pour certaines applications, il importe de garantir une puissance surfacique minimale dans toute la zone de couverture. Si l'on veut alors garantir cette puissance à la limite de la zone de couverture, l'utilisation d'un faisceau simple (tel qu'en produiraient une seule source d'alimentation et un réflecteur parabolique) entraînerait une puissance surfacique inutilement élevée au centre de cette zone. Il serait préférable de recourir à un faisceau modelé illuminant plus uniformément toute la zone. En dehors de la zone de couverture, la puissance surfacique décroîtra plus rapidement, réduisant du même coup les risques de brouillage. On peut être amené à coordonner les tolérances de pointage et de rotation axiale de l'antenne avec la courbe de gain à la limite du faisceau.

La Fig. 16 indique de façon simplifiée quelques-uns des avantages des faisceaux modelés. Si les limites de la zone de couverture correspondent à l'ouverture à 3 dB d'un simple faisceau circulaire (ou elliptique), on obtiendra, à ces limites, la puissance surfacique requise. On pourrait obtenir la même valeur en combinant par exemple 4 faisceaux plus étroits. On obtiendra évidemment les avantages suivants: niveau de puissance plus uniforme dans la zone de couverture et diminution des rayonnements brouilleurs à l'extérieur de cette zone. La partie hachurée A de la Fig. 16 représente un rayonnement d'énergie inutile dans la zone de couverture, tandis que les parties hachurées B représentent des rayonnements brouilleurs dans les zones adjacentes.

Au stade préliminaire de la conception, il suffit de spécifier la puissance surfacique requise et l'emplacement souhaitable des stations terriennes ou les limites de la zone de service. A l'aide d'ordinateurs, on pourra alors déterminer le nombre, les dimensions, la disposition et la mise en phase des cornets d'antenne pour obtenir la forme de faisceau la plus favorable. Les données fournies par le concepteur de l'antenne pourront ensuite servir à établir des compromis avec d'autres facteurs tels que les dimensions, le poids et la puissance de l'engin spatial, en vue de déterminer la conception optimale de l'ensemble du système à satellite.

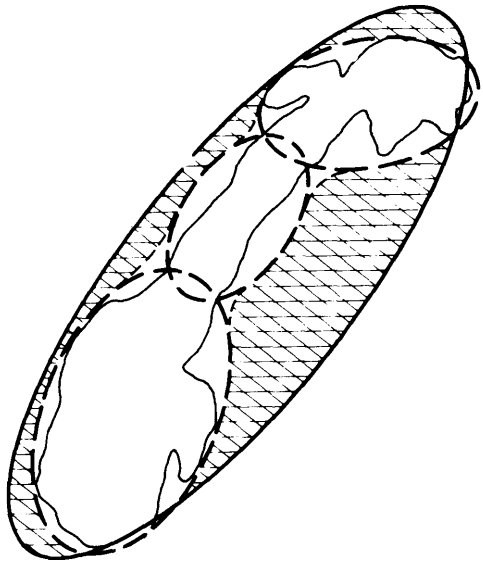


FIGURE 15 — *Exemple de couverture efficace par faisceau modelé*

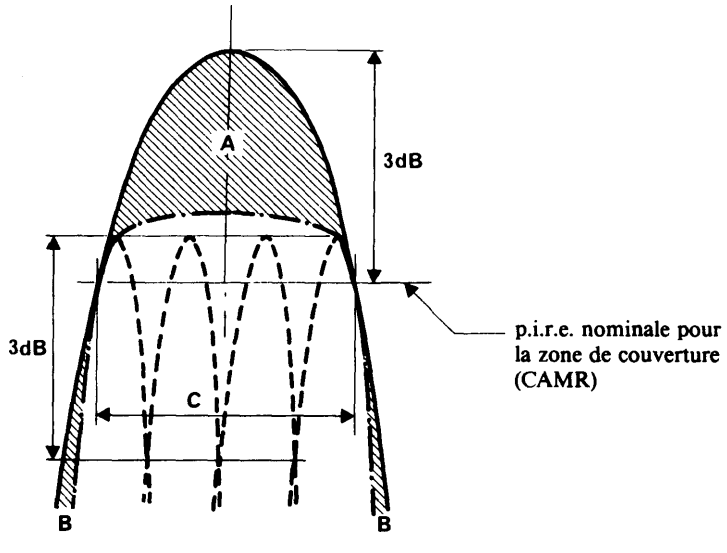


FIGURE 16 — *Section transversale d'un faisceau modelé*

— — — Faisceaux élémentaires dans une antenne à faisceau modelé

A : rayonnement d'énergie inutile dans la zone de couverture
B : rayonnements brouilleurs dans les zones adjacentes
C : largeur de la zone de couverture, c'est-à-dire ouverture à 3 dB d'un faisceau

4. Diagramme de rayonnement de référence des antennes de satellite

Il semble souhaitable de donner des directives pour établir un diagramme qui servira de base pour les antennes de satellite dont les diagrammes ont des enveloppes de forme relativement simple, comme c'est le cas pour les antennes qui ont des lobes principaux circulaires simples. Il est également souhaitable d'établir, pour ces types d'antennes, un diagramme de référence provisoire pour faire les calculs nécessaires à la coordination, comme indiqué dans l'Appendice 29 au Règlement des radiocommunications (Actes finals de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales), si l'on ne dispose pas de diagrammes réels.

Comme indiqué précédemment, le diagramme de rayonnement de l'antenne de satellite est aussi important dans la région du lobe principal que dans celle des lobes latéraux les plus éloignés; le diagramme indiqué ci-dessous commence à partir du contour à -3 dB du lobe principal et est divisé en quatre régions:

$$G(\theta) = G_m - 3\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^2 \quad \text{dB pour } \theta_0 \leqslant \theta \leqslant 2{,}6\,\theta_0 \tag{1}$$

$$G(\theta) = G_m - 20 \quad \text{dB pour } 2{,}6\,\theta_0 < \theta \leqslant 6{,}3\,\theta_0 \tag{2}$$

$$G(\theta) = G_m - 25 \log\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) \quad \text{dB pour } 6{,}3\,\theta_0 < \theta \leqslant \theta_1 \tag{3}$$

$$G(\theta) = -10 \quad \text{dB pour } \theta_1 < \theta \tag{4}$$

où

$G(\theta)$: gain correspondant à l'angle θ par rapport à l'axe du faisceau,

G_m : gain maximal dans le lobe principal,

θ_0 : moitié de l'ouverture de faisceau à 3 dB dans le plan considéré (3 dB au-dessous de G_m),

θ_1 : valeur de θ lorsque $G(\theta)$, dans l'équation (3), est égal à -10 dB.

Ces fonctions sont indiquées dans la Fig. 13.

L'expression (1) est l'une des fonctions qui peuvent être utilisées pour obtenir une approximation du lobe principal dans un faisceau simple (non modelé). Dans la région comprise entre -3 dB et -20 dB, selon les hypothèses faites ici, cette fonction donne des valeurs de gain qui sont généralement plus élevées que celles que l'on obtient en fait avec des antennes à faisceau simple. L'expression (2) s'applique aux premiers lobes latéraux, elle est établie d'après les valeurs typiques que l'on obtient lorsqu'on ne cherche pas à réduire les niveaux des premiers lobes latéraux. L'expression (3) s'applique aux lobes latéraux plus éloignés. On a une pente de $-7{,}5$ dB/octave, comme dans le diagramme de référence de la station terrienne. La quatrième région (expression (4)) est également déduite du diagramme de référence de la station terrienne.

Toutefois, des difficultés ont surgi lorsqu'on a essayé d'appliquer ce diagramme à un faisceau elliptique (voir [CCIR, 1974-78]). Les administrations sont donc invitées à présenter des diagrammes de rayonnement mesurés avec des faisceaux plus complexes que de simples faisceaux circulaires, notamment des faisceaux elliptiques.

5. Conclusions

Du point de vue de la construction des antennes de satellite, il est peu probable que l'on obtienne une utilisation efficace de l'orbite, à moins d'en faire un objectif précis. En général, des ouvertures plus grandes que celles qui sont nécessaires pour obtenir la p.i.r.e. requise sur une zone de couverture donnée permettent d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'orbite. Par conséquent, il semble souhaitable de définir des objectifs pour les diagrammes de rayonnement de référence de satellite. Pour augmenter la capacité de l'orbite, le diagramme doit avoir les caractéristiques générales suivantes:

- le diagramme du lobe principal des antennes de satellite devrait être modelé de manière qu'il couvre aussi exactement que possible la zone à desservir (le modelage du faisceau dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation est souhaitable);
- les lobes latéraux en dehors de la zone de couverture devraient être maîtrisés. L'utilisation de techniques permettant de réduire le niveau du premier lobe latéral et d'augmenter la pente de l'enveloppe des lobes latéraux éloignés doit être encouragée;
- les limites d'orientabilité des antennes à faisceau étroit ne devraient pas restreindre exagérément le positionnement d'un satellite sur l'orbite des satellites géostationnaires.

De nombreux paramètres influent sur les diagrammes complexes d'antennes de satellite qui affectent l'efficacité d'utilisation de l'orbite. Il faudra poursuivre les études avant de pouvoir formuler des conclusions générales.

On ne sait pas actuellement s'il est possible de mettre au point, pour les antennes de satellite, un diagramme de référence applicable au grand nombre de diagrammes complexes qui peuvent être utilisés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SHINJI, M. et autres [juin 1974] Shaped beam horn-reflector antenna for domestic communication satellite. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, Vol. 57-B, 353.

Documents du CCIR

[1974-78]: 4/233 (Japon).

BIBLIOGRAPHIE

DION A. et RICARDI, L. [février 1971] A variable coverage satellite antenna system. *Proc. IEEE*, Vol. 59, **2**, 252-262.

DUNCAN, J. W. [octobre 1969] Maximum off-axis gain of pencil beams. *Proc. IEEE*, (Lett.), Vol. 57, **10**, 1791-1792.

TAYLOR, T. T. [janvier 1960] Design of circular apertures for narrow beamwidth and low side lobes. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-8, **1**, 17-22.

TILLOTSON, L. C. [décembre 1968] A model of a domestic satellite communication satellite system. *BSTJ*, Vol. 47, **10**, 2111-2137.

ANNEXE I

ANTENNES DE SATELLITE A FAISCEAU MODELÉ (FAISCEAU A COUVERTURE MONDIALE)

1. Introduction

Les longueurs de trajet et les affaiblissements des signaux dans l'atmosphère, entre un satellite et divers points de la surface terrestre, présentent des différences notables; pour cette raison, un faisceau d'antenne à couverture mondiale du type habituel, avec un gain maximal dans la direction perpendiculaire à la surface terrestre, n'est pas optimal car il donne un gain élevé là où les affaiblissements de trajet sont minimaux. Puisque les trajets tangents à la surface de la Terre sont les plus longs et que leur passage à travers l'atmosphère l'est également, c'est dans cette zone que le gain de l'antenne devrait être le plus élevé tandis que, perpendiculairement à la surface terrestre, il pourrait être un peu plus faible. Il y a donc intérêt à avoir des faisceaux à couverture mondiale répondant à ces caractéristiques, pour une utilisation rationnelle de la puissance du satellite. On a étudié et mis au point des antennes ayant des faisceaux de ce type. Il s'agit d'un cornet avec charge diélectrique [Satoh, 1972] et d'un réseau d'antennes en cornet [Ajioka et Harry, 1970].

2. Exemple de diagramme de rayonnement obtenu

Un exemple de diagramme de rayonnement effectivement obtenu est représenté sur la Fig. 17; il s'agit d'une antenne à 23,3 GHz avec charge diélectrique.

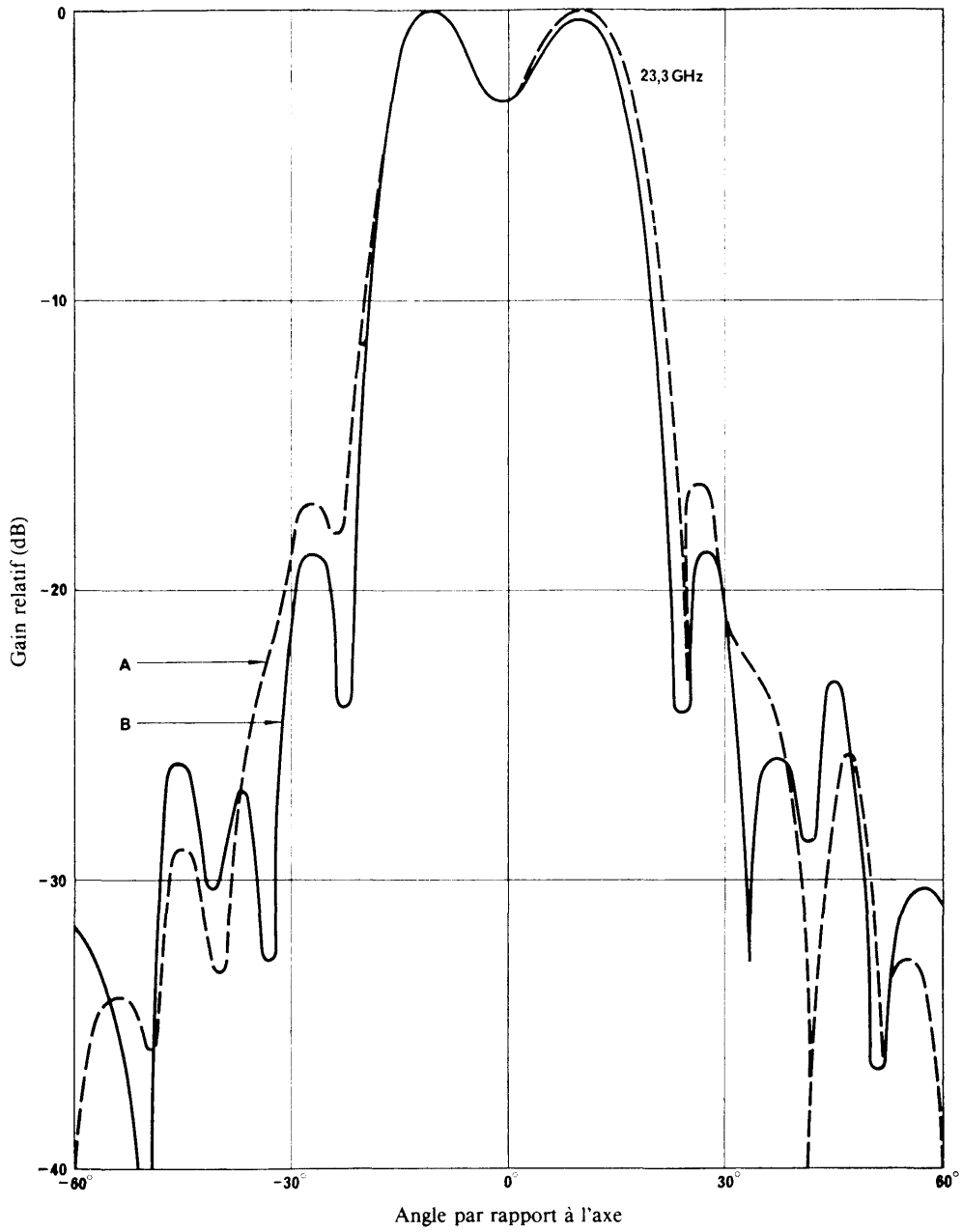


FIGURE 17 — *Diagramme d'un faisceau à couverture mondiale spécialement formé, fourni par une antenne en cornet avec charge diélectrique*

A: plan H
B: plan E

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AJIOKA, J. S. et HARRY, H. E. [mai 1970] Shaped beam for earth coverage from a stabilized satellite. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-18, **3**, 323-327.

SATOH, T. [mars 1972] Dielectric-loaded horn antennae. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-20, **2**, 199-201.

ANNEXE II

MODELAGE DU FAISCEAU PAR LA COMBINAISON DE PLUSIEURS SOURCES RAYONNANTES DANS UN RÉFLECTEUR PARABOLIQUE COMMUN

La conception de l'antenne du satellite Intelsat IV-A, utilisé au-dessus de l'océan Atlantique, offre un exemple de la manière dont on modèle le faisceau pour répondre aux besoins de la zone de couverture tout en assurant une protection suffisante entre les zones de couverture pour permettre une réutilisation de la fréquence.

La Fig. 18 montre les contours de la zone de service minimale typique nécessaire pour la réutilisation est-ouest de la fréquence. Les spécifications exigent une p.i.r.e. donnée et des rapports porteuse/brouillage minimaux de 27 dB dans ces contours sur les liaisons montante et descendante. A l'intérieur des contours spécifiés de la zone de couverture, les stations terriennes sont indiquées par un point; les variations d'orientation du satellite permises par les spécifications sont indiquées par un rectangle entourant le point.

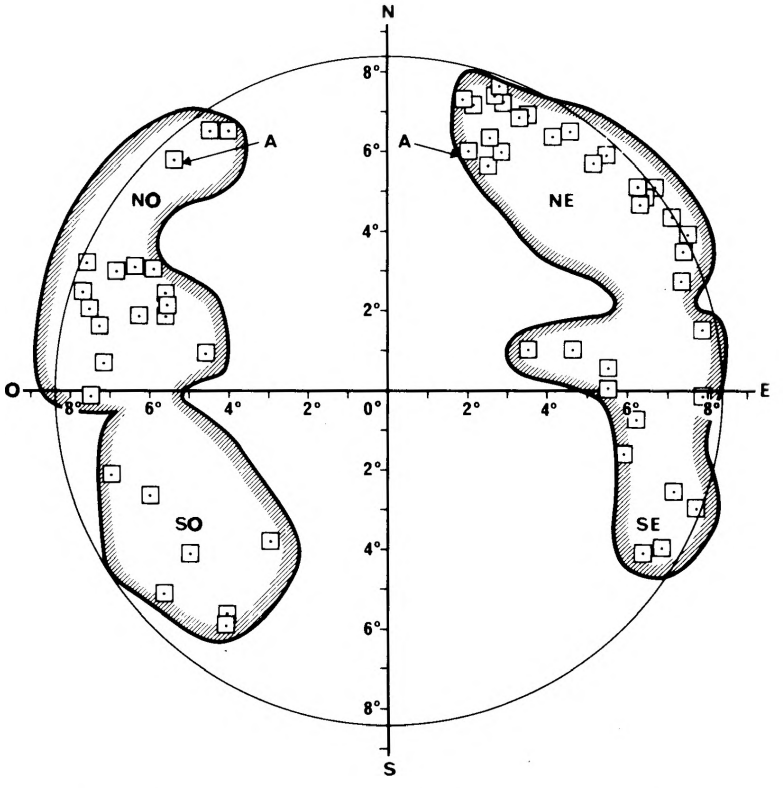


FIGURE 18 — *Zones de couverture spécifiées pour l'antenne du satellite Intelsat - IV A. vues du satellite*

A: emplacement des stations terriennes

La Fig. 19 représente les contours pour chaque faisceau du réflecteur parabolique commun. Chacun de ces faisceaux est produit par un groupe de sources rayonnantes, de manière que la forme du faisceau corresponde aux conditions d'exploitation requises; de cette façon, on obtient une décroissance rapide du gain en dehors de la zone de service dans des directions où il est particulièrement nécessaire de limiter les niveaux de brouillage entre faisceaux. On obtient la couverture requise par les spécifications en combinant de manière appropriée la phase des faisceaux est et des faisceaux ouest.

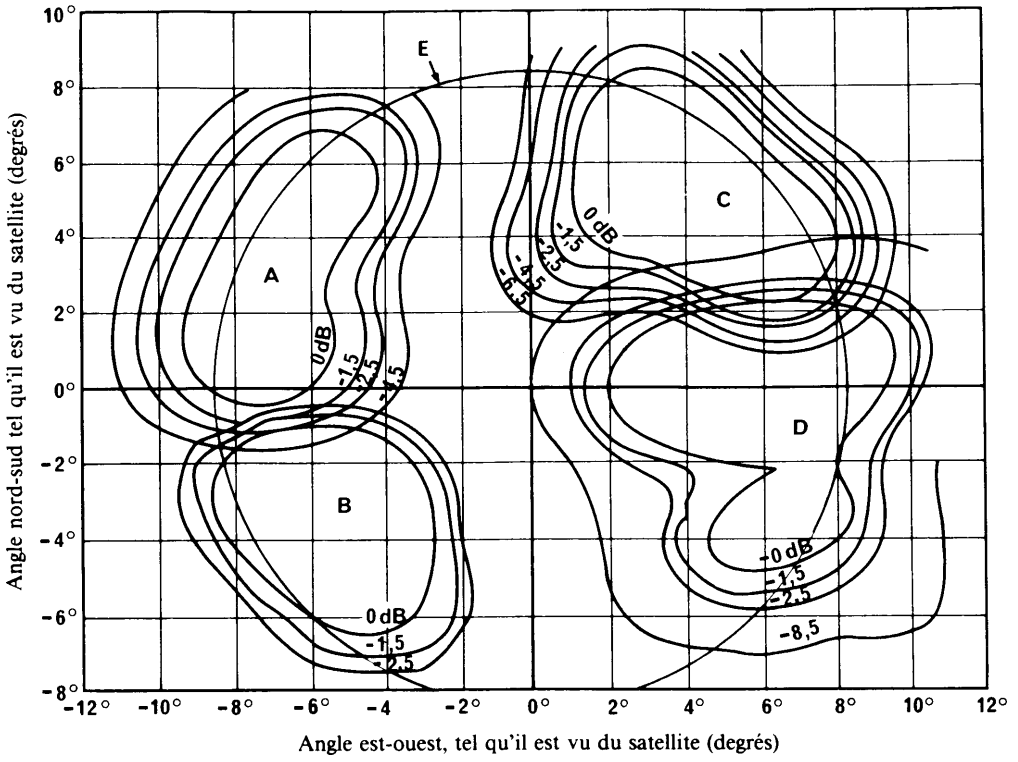


FIGURE 19 — *Contours types mesurés des faisceaux d'antennes du satellite Intelsat-IV A; la p.i.r.e. est exprimée en dB par rapport à la valeur spécifiée pour le pourtour de la zone de couverture. Fréquence: 3975 MHz*

A: faisceau nord-ouest
B: faisceau sud-ouest
C: faisceau nord-est
D: faisceau sud-est
E: pourtour de la Terre

La Fig. 20 représente le contour mesuré de la zone de couverture du faisceau sud-est par rapport à la couverture spécifiée et aux contours de protection. Les contours calculés dans le cas d'une antenne à plusieurs alimentations sont également indiqués. On voit que les prévisions sont assez précises en ce qui concerne les contours de gain élevé du faisceau composé, mais beaucoup moins précises pour les faibles niveaux dans les lobes latéraux. Ce manque de précision s'explique principalement par la difficulté d'évaluer les effets du couplage pour les niveaux faibles.

Etant donné un réflecteur parabolique approprié, pour un faisceau modelé, le cœur du système d'antennes se compose des cornets d'alimentation et des circuits qui alimentent les cornets pour produire l'illumination optimale du réflecteur permettant de former une configuration particulière du faisceau. L'emploi des polarisations horizontale et verticale permet une augmentation de capacité et une meilleure utilisation des fréquences. Des groupes de 15 cornets ou plus, disposés sur plusieurs rangées, peuvent former les faisceaux nécessaires à chaque polarisation. Les groupes de cornets et les circuits qui les alimentent sont en général communs aux bandes de fréquences d'émission et de réception.

Le couplage mutuel entre plusieurs dispositifs de sources rayonnantes peut être considéré à deux égards. Premièrement, dans le cas d'un faisceau pris individuellement, le couplage mutuel se traduit par une faible excitation parasite de tous les autres dispositifs de sources voisins du dispositif excité. Deuxièmement, lorsque plusieurs faisceaux composants sont excités simultanément pour former un groupe, le couplage mutuel a pour effet de modifier, dans chaque dispositif de sources rayonnantes, l'impédance d'entrée, de sorte que l'amplitude et le déphasage relatifs désirés ne sont pas répartis avec précision. Ainsi, l'avantage principal des calculs prévisionnels est que l'on peut évaluer le nombre de sources rayonnantes nécessaires ainsi que leurs positions approximatives dans le plan focal de l'antenne; il ne faut cependant pas s'attendre à obtenir des prévisions exactes en ce qui concerne les contours de protection.

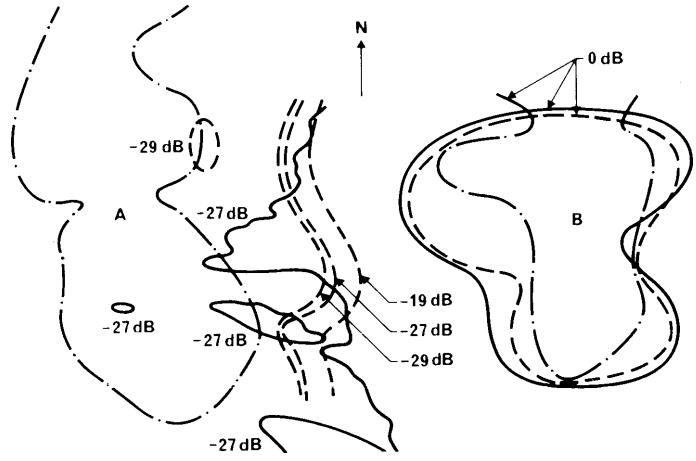


FIGURE 20 — *Satellite Intelsat-IVA. Contour du faisceau sud-est de l'antenne, vu du satellite. La p.i.r.e. aux contours est exprimée en dB par rapport à la valeur spécifique pour le pourtour de zone de couverture. Fréquence: 3950 MHz*

———— Contour mesuré

– – – – – Contour calculé d'après la distribution de l'alimentation

——·—— Contour spécifié

A : zone de protection
B : zone de couverture

ANNEXE III

CARACTÉRISTIQUES DES LOBES LATÉRAUX DES ANTENNES DE SATELLITE A GAIN ÉLEVÉ

Pour pouvoir réutiliser les fréquences au moyen d'antennes de satellite à gain élevé, il faut que le rayonnement des lobes latéraux de ces antennes puisse être affaibli au maximum, de manière à obtenir une bonne discrimination par rapport aux zones de couverture adjacentes où l'on utilise la même bande de fréquences. En outre, il faudrait pouvoir connaître exactement les diagrammes de rayonnement des lobes latéraux des antennes de satellite pour pouvoir coordonner les systèmes à satellites utilisant des positions adjacentes de l'orbite des satellites géostationnaires.

On trouvera dans les Fig. 21 et 22 les résultats de mesures faites sur une antenne expérimentale pour satellites géostationnaires, partiellement optimisée, destinée à desservir une zone circulaire sous une ouverture angulaire de 1,35° à partir de l'antenne. Il s'agit d'un paraboloïde à symétrie circulaire, à alimentation au centre, ayant un diamètre de 1,20 m et un rapport distance focale/diamètre de 0,38. Elle fonctionne dans la bande de fréquences de 11,7 à 12,5 GHz et a été conçue aussi bien pour la polarisation rectiligne que pour la polarisation circulaire. Le système d'alimentation primaire se compose d'un élément rayonnant circulaire à guide d'ondes dont la bride se trouve presque dans le plan de l'ouverture du réflecteur. Grâce à plusieurs cannelures concentriques ménagées sur le bord de l'élément rayonnant, on obtient une alimentation primaire ayant un diagramme à symétrie circulaire et à large bande. Les dimensions sont calculées de telle manière qu'on obtient une illumination en phase dans le plan de l'ouverture du paraboloïde. Cette illumination est aussi progressive que possible entre le centre et le bord de l'ouverture. On s'est efforcé d'autre part d'avoir une forme proche de la fonction $J_0 (2 \eta \frac{x}{\lambda} \sin \varphi_0)$ (J_0: fonction de Bessel, x: rayon, $2 \varphi_0$: angle d'illumination de la zone de couverture, η: rendement, λ: longueur d'onde) qui est optimale pour une illumination en phase.

En polarisation circulaire, on peut espérer obtenir les diagrammes similaires avec une symétrie circulaire très améliorée, mais il n'est pas encore possible d'indiquer quel type de polarisation serait le plus favorable pour des antennes de satellite à gain élevé. On a cependant des raisons de penser qu'avec la polarisation rectiligne on n'a guère qu'une petite dépolarisation dans la zone desservie ainsi que dans les zones adjacentes perturbées. La discrimination en polarisation croisée (Fig. 22) n'est pas encore optimisée et ne saurait être considérée comme typique pour les autres antennes car elle dépend, entre autres choses, de la structure particulière du support du système d'alimentation.

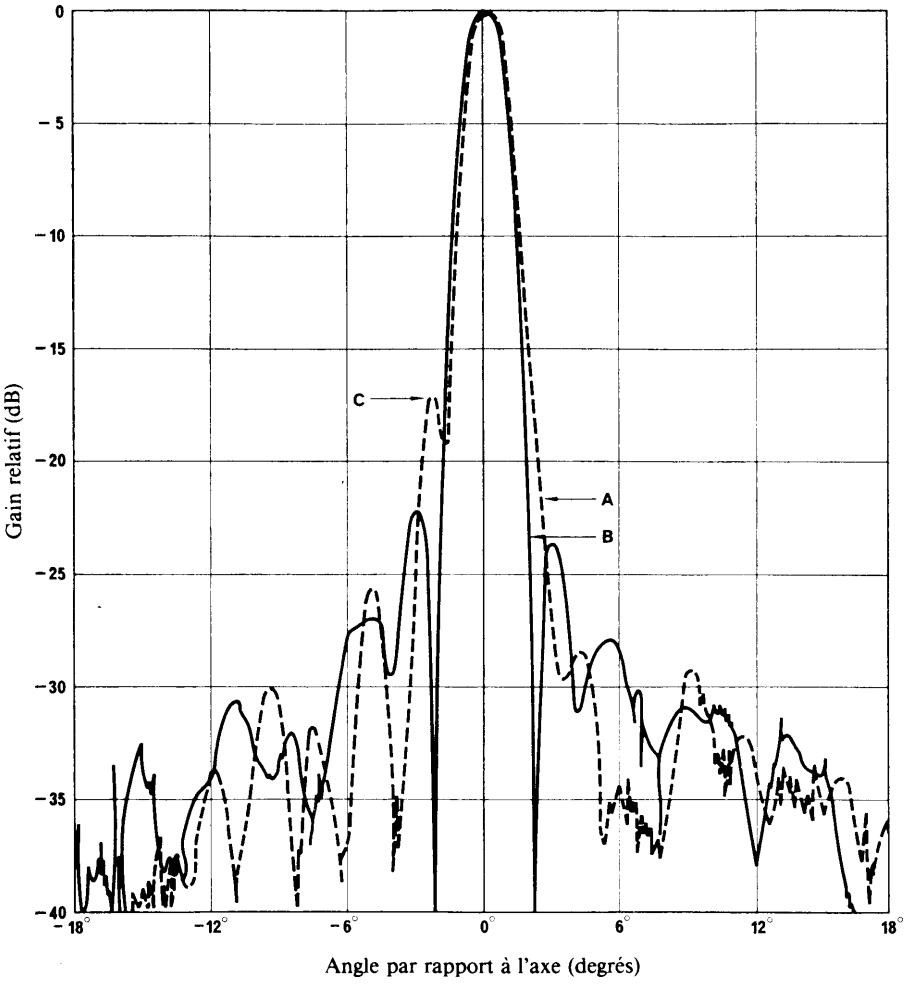


FIGURE 21 — *Diagramme de rayonnement d'un paraboloïde, alimenté au foyer*

11,7 GHz, polarisation horizontale

A: plan H B: plan E C: réflexion au sol

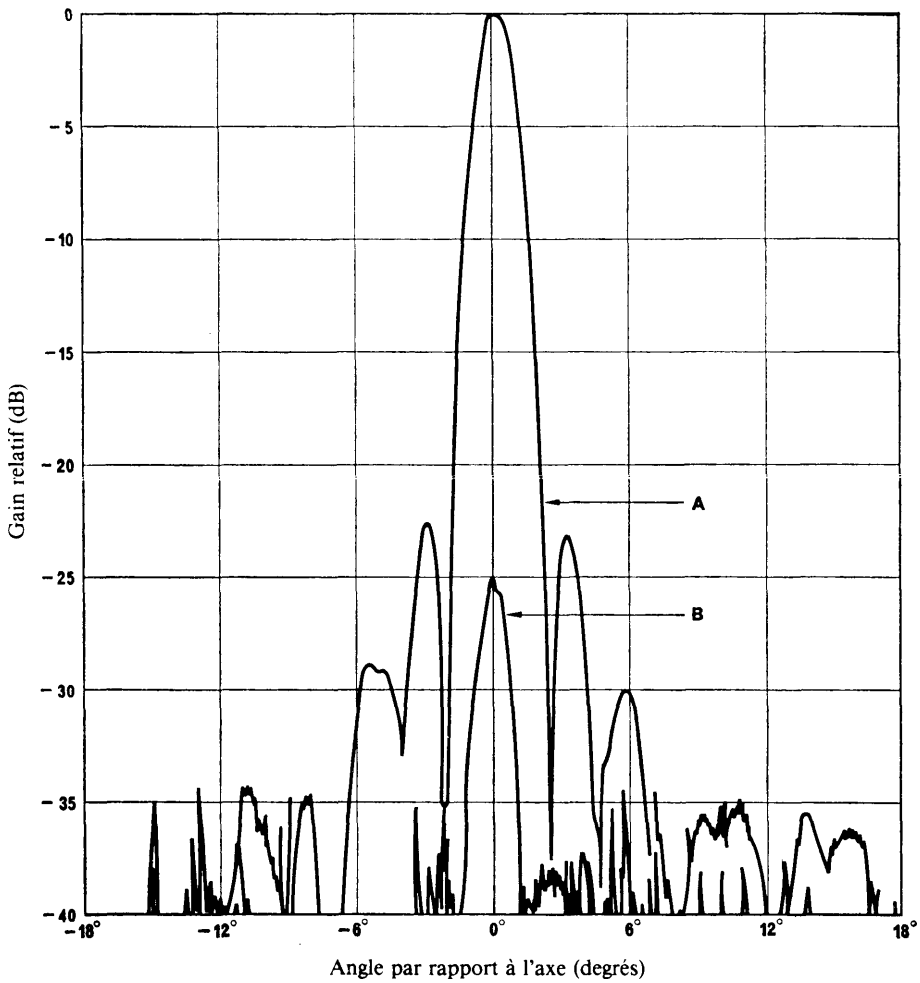


FIGURE 22 — *Diagramme montrant la réponse en polarisation orthogonale*

11,7 GHz, plan E

A: même polarisation B: polarisation orthogonale

RAPPORT 559

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DE MODULATION SUR L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1974)

1. Introduction

La technique de la modulation de l'onde porteuse en fréquence ou en phase a, jusqu'à maintenant, été utilisée dans la plupart des systèmes de télécommunication par satellite, la modulation par déplacement de fréquence (MDF) ou par déplacement de phase (MDP) étant, en particulier, utilisée pour les systèmes de transmission de signaux numériques. Un paramètre dont l'influence est grande sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires est le rapport de la largeur de bande de fréquences radioélectrique nécessaire, B, à la largeur de bande contenant l'information, cette dernière étant exprimée comme la fréquence supérieure de la bande de base, f_m, pour les transmissions analogiques, ou comme le débit binaire transmis, r, en bit/s, lorsqu'il s'agit de transmissions de signaux numériques. Si le système est bien conçu, ces rapports B/f_m et B/r sont liés à la protection du signal modulé contre le brouillage [Tillotson et autres, 1973]. Ainsi, pour une qualité de fonctionnement donnée du circuit, le rapport minimal acceptable porteuse/bruit peut diminuer quand ces rapports augmentent.

Deux cas d'espèce sont analysés dans le présent Rapport, portant tous deux sur des ensembles homogènes de satellite en orbite. L'un se compose de réseaux utilisant la MDF-MF et l'autre de réseaux utilisant des transmissions numériques MDP. Chaque cas a été examiné à l'aide de deux méthodes, à savoir une évaluation analytique générale décrite au § 2 et un examen plus détaillé, exposé au § 3, où l'on n'a fait varier qu'un petit nombre de caractéristiques.

2. Etude analytique générale

Les relations établies dans l'Annexe I (équations (1) et (2)) montrent que l'utilisation des techniques de modulation précitées conduit à un compromis entre le rapport porteuse/bruit et B/f_m ou B/r. Pour augmenter la capacité d'une seule voie de transmission, il serait donc préférable d'utiliser de faibles valeurs de B/f_m ou de B/r. Or, cela peut augmenter la valeur de θ, qui est l'écart angulaire minimal requis entre satellites, dans de si fortes proportions que la capacité totale de l'orbite s'en trouve diminuée.

Ce compromis peut être exprimé par les équations (5) et (6) de l'Annexe I qui sont représentées graphiquement dans les Fig. 1 et 2, pour les hypothèses suivantes:

- rapport brouillage/bruit total: 0,1;
- gain d'antenne de la station terrienne: 59 dB;
- diagramme de l'enveloppe des lobes latéraux de l'antenne de station terrienne (32 − 25 log φ) dB.

Les autres hypothèses faites pour cette étude sont indiquées dans [CCIR, 1970-74a].

La Fig. 1 montre que l'efficacité totale de l'utilisation de l'orbite augmente avec B/f_m pour la transmission de signaux analogiques MF. Cependant, il a été démontré que l'efficacité d'utilisation devient presque indépendante de B/f_m si l'on suppose un diagramme beaucoup plus satisfaisant pour l'enveloppe des lobes secondaires.

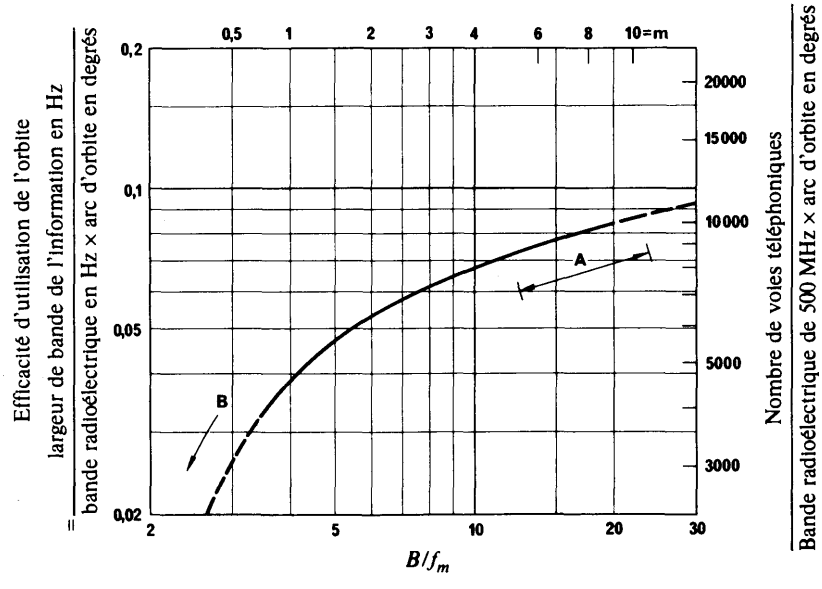


FIGURE 1 — *Efficacité d'utilisation de l'orbite en fonction du rapport B/f_m pour un système à modulation en fréquence et un gain d'antenne réceptrice de station terrienne de 59 dB*

A: Région du seuil
B: Région dans laquelle les réseaux sont limités par la puissance surfacique sur le trajet descendant
m: Indice de modulation crête

La Fig. 2 montre des valeurs optimales bien définies pour les transmissions de signaux numériques MDP. Pour la détection de phase cohérente, la valeur optimale de B/r se situe entre 0,4 et 1,0. Ces valeurs optimales de B/r sont essentiellement indépendantes du diagramme de rayonnement des lobes latéraux de l'antenne de la station terrienne. Pour un rapport codage convolutionnel/décodage séquentiel de 1/2, la valeur optimale de B/r se trouve presque doublée. Dans les deux cas, les conditions optimales correspondent normalement à la MDP quadrivalente ou octovalente et lorsque le rapport largeur de bande/rythme des symboles, BT, (où T est la période du symbole) se situe entre 1,2 et 2,0. Ainsi, le codage de la correction d'erreurs par redondance sans voie de retour peut améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite, mais dans ce cas aussi l'avantage serait moindre si la suppression des lobes latéraux était plus complète.

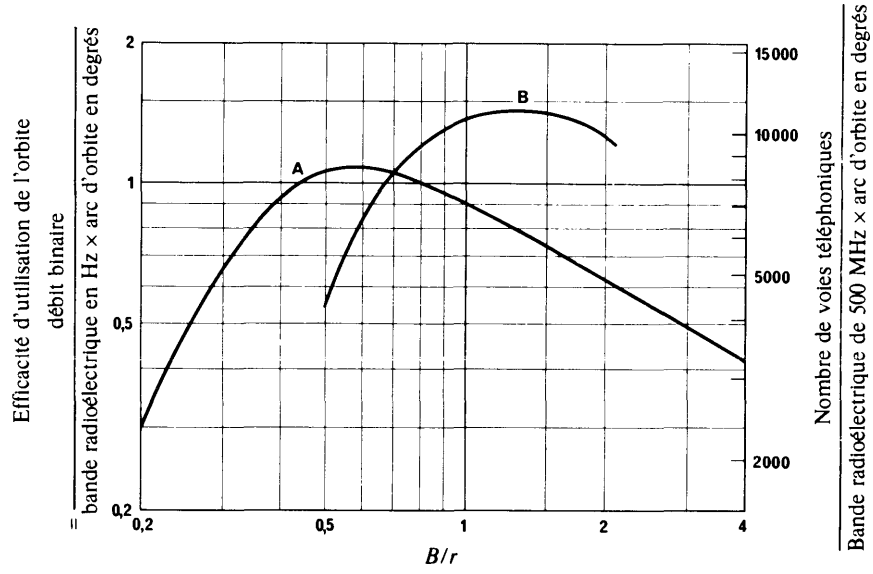


FIGURE 2 — *Efficacité d'utilisation de l'orbite en fonction de B/r modulation numérique. Gain d'antenne réceptrice de la station terrienne = 59 dB*

A: Détection de phase cohérente
B: Taux de décodage séquentiel 1/2

Les analyses décrites dans l'Annexe I ont été faites dans l'hypothèse où les réseaux à satellites fonctionnent dans des conditions optimales, en ce sens que la puissance et la largeur de bande disponibles sont utilisées en totalité. Cependant, un réseau peut être limité soit par la puissance (excès de largeur de bande), soit par la largeur de bande (excès de puissance). Dans ces cas, on pourrait faire varier B/f_m ou B/r, soit pour augmenter la capacité du réseau, soit pour réduire l'espacement entre satellites. Dans un réseau à limitation par la puissance, c'est généralement la première formule qui permettra semble-t-il d'améliorer l'utilisation de l'orbite, alors que dans un réseau à limitation par la largeur de bande, l'utilisation de l'orbite sera généralement améliorée par une réduction de l'espacement entre satellites.

Il convient de noter que, dans cette analyse, on a supposé une dispersion optimale de l'énergie de la porteuse. Si cette dispersion était moins bonne, l'efficacité de l'utilisation de l'orbite serait plus faible.

3. Systèmes à limitation par la largeur de bande

On a analysé les effets des caractéristiques de modulation sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite dans le cas d'une limitation par la largeur de bande et en utilisant les paramètres des systèmes actuellement réalisables [CCIR, 1970-74b]. On a pris pour base les caractéristiques suivantes:

Bandes de fréquences: 4 et 6 GHz.

Rapport gain/température de bruit de la station terrienne: 40,7 dB(K^{-1}).

Largeur de bande du satellite: 36 MHz par répéteur, 12 répéteurs par satellite.

Enveloppe des lobes latéraux des antennes: conformément à l'Avis 465.

Marge pour le brouillage en MF: Avis 466.

Marge pour le bruit de brouillage en MDPC: pas de limite pour les objectifs de performance supposés.

P.i.r.e. maximale: 35 dBW par répondeur.

Les résultats illustrés par la Fig. 3 montrent que, pour des systèmes limités par la largeur de bande, l'efficacité d'utilisation de l'orbite augmente lorsqu'on réduit l'espacement des satellites.

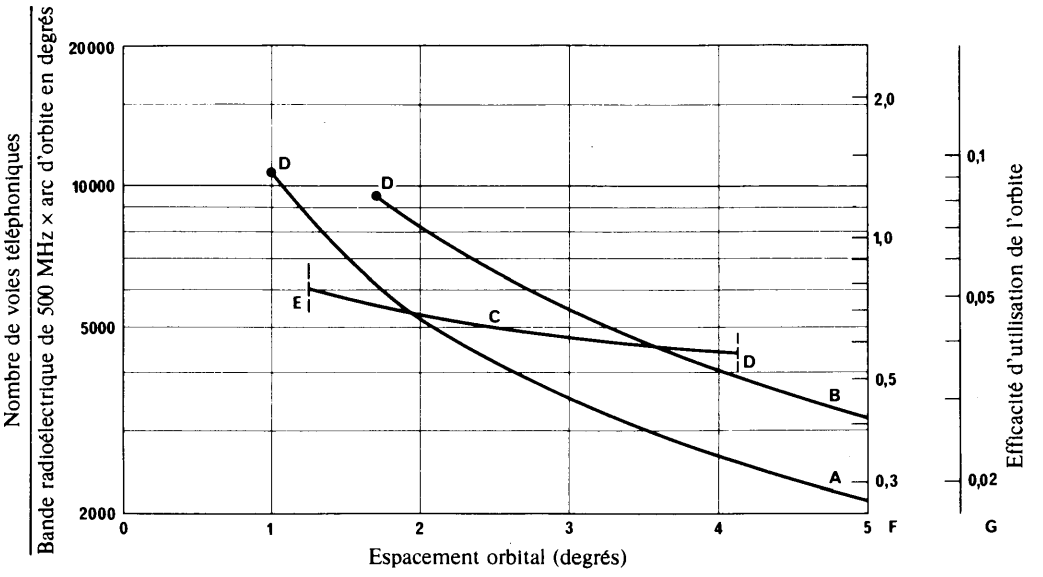


FIGURE 3 — *Efficacité d'utilisation de l'orbite en fonction de l'espacement orbital*

(G/T = 40,7 dB(K^{-1}) maintien en position parfait)

A: MDPC quadrivalente
B: MDPC octovalente
C: MF-MRF
D: limitation par la puissance
E: limitation par le seuil
F: échelle pour la modulation numérique
G: échelle pour la modulation de fréquence

Dans le cas de systèmes MRF-MF, on fait varier l'indice de modulation de façon à maintenir à un niveau constant le bruit total dans une voie téléphonique. Il faut noter que l'efficacité d'utilisation de l'orbite est relativement indépendante de l'espacement des satellites, dans les limites imposées par les conditions de seuil et les restrictions de la puissance du satellite.

Pour la modulation numérique par déplacement de phase (voir la Fig. 3), le rapport B/r est fixe, de sorte que l'efficacité d'utilisation de l'orbite et l'utilisation du spectre sont inversement proportionnelles à l'espacement des satellites. Si l'on réduit l'espacement, il faut augmenter la puissance du satellite jusqu'à ce qu'on obtienne des limites égales de puissance et de largeur de bande aux points indiqués. Comme le montre la Fig. 2, la modulation de phase quadrivalente permet, dans ces conditions, une légère augmentation de l'utilisation de l'orbite et du spectre.

Il convient de noter que des espacements de satellites réduits (1° à 2°) et des gains d'antenne de station terrienne d'environ 59 dB permettent une utilisation optimale de l'orbite et du spectre. L'espacement des satellites peut cependant être limité par d'autres facteurs, par exemple les tolérances applicables au maintien en position et la réduction de la puissance surfacique sur le trajet descendant. Mais la puissance surfacique ne constitue pas un facteur limitatif dans les cas considérés ici.

Pour les faibles séparations angulaires envisagées ci-dessus, les tolérances relatives au maintien en position prennent de l'importance. Avec la tolérance actuelle de ± 1°, la valeur nominale de l'espacement peut se trouver limitée à 3° environ, bien qu'il soit possible, comme l'indique la Fig. 3, d'obtenir un espacement de 1° lorsque le maintien en position est parfait.

Lorsqu'un système numérique est limité par la largeur de bande, la modulation de phase octovalente permet d'obtenir une meilleure efficacité d'utilisation de l'orbite que la modulation de phase quadrivalente. Cela implique qu'une nouvelle réduction de B/r se traduirait par une meilleure utilisation de l'orbite. Cependant, la puissance requise pour le satellite et les puissances surfaciques qui en résultent sur le trajet descendant augmentent rapidement (comme le montre la Fig. 5 de l'Annexe I) lorsque la valeur de B/r est inférieure à 0,4.

Les effets que peuvent avoir, sur la capacité de l'orbite, d'autres considérations pratiques dans la conception d'un système à satellites sont exposés dans l'Annexe II. Des rapports B/f_m ou des indices de modulation élevés peuvent augmenter sensiblement le nombre de satellites et d'antennes de station terrienne pour un grand système avec un grand nombre d'emplacements de stations terriennes.

4. Conclusions

La puissance requise pour le satellite et les stations terriennes et la protection contre le brouillage sont fonction des rapports B/f_m, rapport de la largeur de bande de transmission à la largeur de bande de l'information, et B/r, rapport entre la largeur de bande requise et le débit d'information. Ces rapports sont donc des paramètres qui influent sur l'efficacité avec laquelle l'orbite est utilisée.

On peut formuler les quelques conclusions générales résumées ci-après:

- Pour les systèmes analogiques à modulation de fréquence, l'efficacité d'utilisation de l'orbite augmente lorsque le rapport B/f_m croît.
- Pour les systèmes numériques à modulation de phase polyvalente, les valeurs optimales de B/r correspondent à la modulation de phase quadrivalente ou octovalente avec détection de phase cohérente.
- Des techniques de modulation perfectionnées, telles que le codage de convolution et le décodage séquentiel, peuvent améliorer quelque peu l'efficacité d'utilisation totale de l'orbite; cependant, l'utilisation de décodeurs séquentiels à débit binaire élevé ne semble pas possible dans les conditions actuelles.
- Pour une même quantité de brouillage d'origine externe et en supposant qu'il faut un débit binaire de 64 kbit/s pour une voie téléphonique codée, l'efficacité d'utilisation de l'orbite est essentiellement la même que dans le cas de MRF-MF et MIC-MDP.
- Dans le cas des systèmes à limitation par la puissance, on obtient généralement une plus grande amélioration de l'utilisation de l'orbite en accroissant le rapport B/f_m ou B/r plutôt qu'en réduisant l'espacement des satellites.
- Pour les systèmes à limitation par la largeur de bande, c'est généralement l'inverse qui est vrai. Si l'espacement des satellites est limité par d'autres facteurs, on peut améliorer l'utilisation de l'orbite en réduisant la valeur de B/f_m ou de B/r.
- Une augmentation de la pente du «gain en dehors de l'axe principal» des antennes de station terrienne a pour effet de rendre la capacité de l'orbite moins sensible aux variations de B/f_m mais n'affecte que légèrement la valeur optimale de B/r.
- La gamme des valeurs de B/f_m ou B/r tend à être limitée également par des considérations d'ordre pratique concernant le nombre des antennes et des satellites (voir l'Annexe II).
- Une méthode optimale de dispersion de l'énergie doit être utilisée de façon que l'espacement entre satellites ne soit pas limité par les restrictions imposées à la puissance surfacique sur le trajet descendant, et pour augmenter au maximum la capacité de l'orbite.
- Dans le cas d'une antenne de station terrienne de grandes dimensions, une faible séparation angulaire permet une efficacité d'utilisation maximale de l'orbite, qui peut alors être fortement influencée par les tolérances applicables au maintien en position.

Lors de la conception de systèmes limités par la puissance, on a généralement tendance à choisir les caractéristiques de modulation qui améliorent l'utilisation de l'orbite, de façon à utiliser au maximum la puissance du satellite; ce n'est pas toujours vrai avec les systèmes à limitation par largeur de bande.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TILLOTSON, L. C., RUTHROFF, C. L. et PRABHU, V. K. [avril 1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. *Proc. IEEE*, Vol. 61, **4**, 445-452.

Documents du CCIR

[1970-74]: **a.** 4/224 (Etats-Unis d'Amérique); **b.** 4/245 (Canada).

ANNEXE I

FONCTIONS GÉNÉRALISÉES REPRÉSENTANT L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE

1. Modulation en fréquence des signaux analogiques

La fonction de transfert en modulation de fréquence multivoie peut s'exprimer en fonction de B/f_m (voir le § 1 du Rapport) dans des conditions typiques. Pour un signal modulant en forme de bruit blanc gaussien, un rapport puissance de crête/puissance efficace égal à 4, une largeur de bande B conforme à la règle de Carson, une préaccentuation théorique (équivalente à la modulation de phase) et un rapport pondéré typique fréquence d'essai/bruit de 48 dB, le rapport normalisé porteuse/bruit requis est:

$$E_0/N_0 = \frac{64\,000}{3} \cdot \frac{1}{B/f_m\,(B/f_m - 2)^2} \qquad (1)$$

où:

f_m : la plus haute fréquence de modulation (Hz)

B : largeur de bande radioélectrique (Hz)

$E_0 = C/B$, (W par Hz) où C: puissance de la porteuse

N_0 : puissance de bruit par Hz (W par Hz)

2. Modulation en phase des signaux numériques

Lorsque les ondes porteuses sont modulées par des signaux numériques, le rapport signal/bruit normalisé est exprimé par E_b/N_0 (énergie par bit/puissance de bruit par Hz) et la performance du circuit est exprimée en taux d'erreur sur les bits. Pour une modulation de phase polyvalente, la valeur requise du rapport E_b/N_0 pour un taux d'erreur donné à la sortie dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris le nombre d'états significatifs (m), la méthode de codage et de détection, et BT, le rapport de la largeur de bande (B) au taux de transmission du symbole ($1/T$), T étant la durée du symbole. Quand m est supérieur à 2, le signal d'information binaire est généralement groupé en symboles contenant n bits, avec $2^n = m$. La valeur minimale de E_b/N_0 pour une performance donnée est obtenue en l'absence de brouillage entre les symboles, ce qui requiert des valeurs élevées de BT. Dans des cas pratiques où les systèmes ont une valeur de bande limitée, il faut, pour assurer la même performance, une valeur plus élevée de E_b/N_0. Par exemple, quand $BT = 2$ et $m = 4$, E_b/N_0 doit être d'environ 2 dB supérieur à la valeur minimale.

Les caractéristiques réelles de la modulation par déplacement de phase, bivalente et quadrivalente, sont bien établies mais comme ce n'est pas le cas pour $m \geqslant 8$, il faut prévoir une marge supplémentaire appelée fonction composite de l'affaiblissement $L(BT, m)$. La relation entre E_b/N_0, n, m et la fonction L, est alors donnée approximativement par:

$$(E_b/N_0) \approx (E_b/N_0)_0 \cdot \frac{L(BT, m)}{n \sin^2 \frac{\pi}{m}} \qquad (2)$$

où $m \geqslant 4$ et

où $(E_b/N_0)_0$ est une valeur de référence, prise égale à 11 dB pour la détection de phase cohérente et à 2,5 dB dans le cas d'un codage de convolution avec décodage séquentiel. Si l'on porte ces valeurs de (E_b/N_0) dans l'équation (2), on peut calculer une courbe presque continue représentant la variation de E_b/N_0 en fonction de B/r et de E_0/N_0 en fonction de B/r (voir les Fig. 4 et 5).

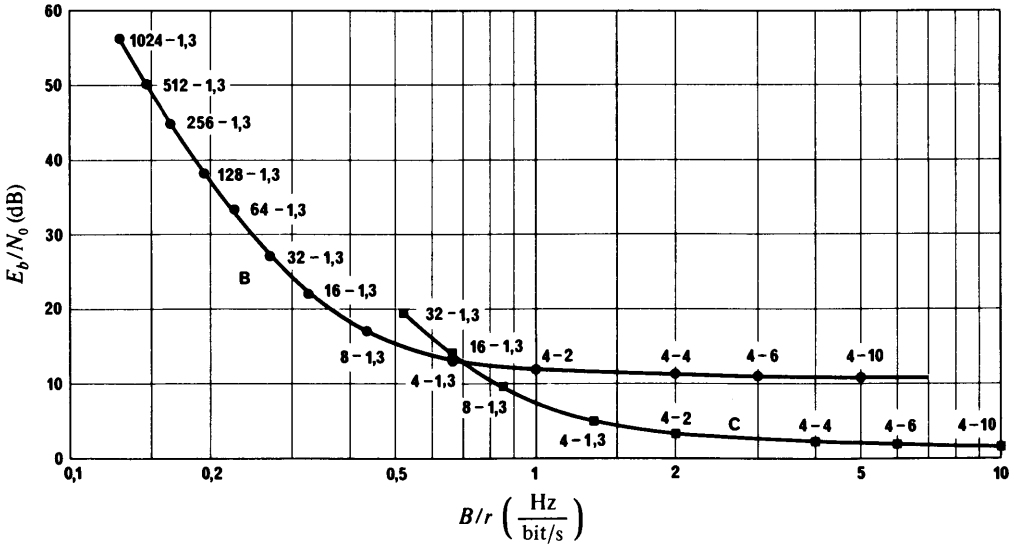


FIGURE 4 — *Rapport E_b/N_0 en fonction de B/r pour un système à modulation numérique*

B : Détection de phase cohérente de référence; E_b/N_0 = 11 dB lorsque BT est supposé infini
C : Taux de décodage séquentiel 1/2

Les chiffres en regard de chaque point, tels que 1024–1,3, représentent le nombre de phases (1024) et le produit BT (1,3)

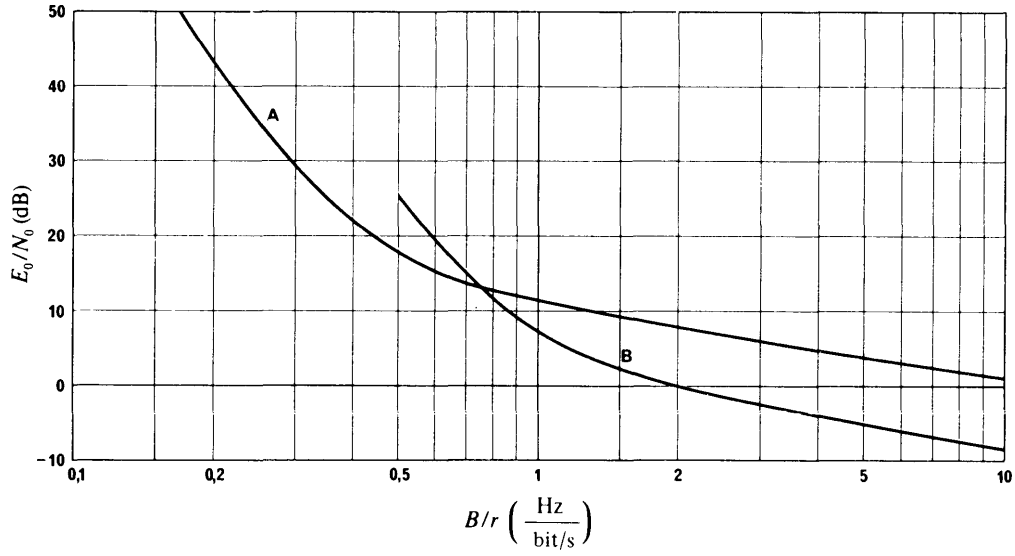


FIGURE 5 — *Rapport E_0/N_0 en fonction de B/r pour un système à modulation numérique*

A: *f(B/r)* détection de phase cohérente B: *f(B/r)* taux de décodage séquentiel 1/2

3. Fonctions décrivant l'efficacité d'utilisation de l'orbite

Lorsqu'on a un groupe homogène de satellites sur orbite, on peut utiliser les fonctions suivantes pour exprimer l'efficacité d'utilisation de l'orbite:

pour les systèmes analogiques:

$$U \sim \frac{f_m}{\theta \cdot B} \tag{3}$$

pour les systèmes numériques:

$$V \sim \frac{r}{\theta \cdot B} \tag{4}$$

où θ est l'espacement angulaire requis entre satellites.

Pour un groupe homogène de satellites uniformément espacés, on peut raisonnablement faire les hypothèses suivantes:

- il n'y a pas de corrélation entre les trajets de brouillage;
- le gain de l'antenne d'émission de la station terrienne est de 4 dB supérieur au gain de l'antenne de réception;
- la combinaison du bruit thermique et du bruit dû au brouillage se comporte comme un bruit thermique.

Dans ce cas, pour les systèmes analogiques:

$$U = \frac{0{,}28^{\frac{1}{x}} \, (B/f_m)^{\frac{1}{x}-1} \, (B/f_m - 2)^{\frac{2}{x}}}{\left[\frac{64\,000}{3} \cdot G_R/G_0 \cdot N_0/I_0\right]^{\frac{1}{x}}} \qquad \frac{\text{Hz}}{\text{Hz-degré}} \tag{5}$$

et pour les systèmes numériques:

$$V = \frac{0{,}28^{\frac{1}{x}}}{B/r \left[G_R/G_0 \cdot N_0/I_0\right]^{\frac{1}{x}} \left[f\left(\frac{B}{r}\right)\right]^{\frac{1}{x}}} \qquad \frac{\text{débit binaire}}{\text{Hz-degré}} \tag{6}$$

où:

I_0 : densité du bruit dû au brouillage, partie de N_0, densité totale du bruit (W/Hz)

G_0 : gain d'antenne le long de l'axe du faisceau principal

G_R : gain d'antenne à 1° par rapport à l'axe du faisceau principal

x : pente de l'enveloppe des lobes latéraux de l'antenne de la station terrienne,

avec $G(\theta) = \dfrac{G_R}{\theta^x}$,

$G(\theta)$ étant le gain au dehors de l'axe du faisceau et G_R le gain pour $\theta = 1°$.

ANNEXE II

INFLUENCE DE L'INDICE DE MODULATION SUR L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE DANS LE CAS D'ONDES PORTEUSES MODULÉES EN FRÉQUENCE

La présente Annexe expose les effets de l'indice de modulation, m, sur l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires par des systèmes de téléphonie à multiplexage par répartition en fréquence et modulation de fréquence. On suppose que les satellites sont uniformément espacés, qu'ils ont la même largeur de bande et la même puissance disponible, que le trafic traité par chaque satellite est identique, en ce sens que, dans chaque satellite, le nombre de fréquences porteuses, les fréquences, les indices de modulation, les capacités en voies téléphoniques et la puissance sont identiques; autrement dit, il s'agit d'un ensemble homogène de satellites. On admet que toutes les stations terriennes ont le même facteur de qualité: 40,7 dB(K^{-1}) dans un exemple et 28 dB(K^{-1}) dans un autre.

Le nombre total de voies téléphoniques qui peuvent être exploitées par des satellites dans un segment d'orbite donné est une indication de l'efficacité avec laquelle l'orbite est utilisée. Cette capacité orbitale est exprimée comme étant le nombre de voies téléphoniques par degré d'orbite, pour une largeur de bande radioélectrique donnée. On a constaté que la capacité de l'orbite est d'autant plus élevée que l'indice de modulation * est plus grand. A un accroissement de l'indice de 2 à 10 correspond une amélioration du rendement de 40%.

Toutefois, cette amélioration est obtenue aux dépens de la capacité en voies téléphoniques de chaque satellite. Si l'on augmente l'indice de modulation m de 2 à 10, on réduit la capacité en voies téléphoniques de chaque satellite de 17 900 à 5000, c'est-à-dire dans la proportion de 3,6 à 1. Cette réduction de la capacité d'un système en voies aura aussi pour conséquence l'augmentation du nombre nécessaire d'antennes de station terrienne.

Avec des indices de modulation élevés, la puissance exigée du satellite pour obtenir la valeur requise du bruit thermique est considérablement moindre. Un système dont l'indice de modulation des porteuses radioélectriques est égal à 10 a besoin de 19,5 dB de moins de puissance qu'un système dont l'indice de modulation est 2. Cette réduction de la puissance émise par le satellite est obtenue pour les deux valeurs indiquées plus haut pour le facteur de qualité G/T. Un critère d'efficacité qui combine cette économie de puissance avec la capacité orbitale est le rendement orbital par watt de p.i.r.e. du satellite. Comme on pouvait s'y attendre, l'emploi d'indices de modulation élevés apporte des améliorations considérables, dont la plupart sont dues à l'économie de puissance du satellite. Ce critère d'efficacité montre que l'on peut s'affranchir d'une grande augmentation de brouillage dans le satellite par une faible augmentation de la puissance du satellite.

Le coût du secteur spatial est réduit si l'on peut disposer d'un grand nombre de voies téléphoniques sur un segment orbital donné, avec le plus petit nombre de satellites possible. Cela implique l'emploi de satellites à grande capacité en voies téléphoniques et, partant, de faibles indices de modulation. La puissance nécessaire à un satellite influe également sur son prix de revient. Le choix d'une valeur optimale pour l'indice de modulation est déterminé par deux exigences contradictoires: de faibles valeurs de m pour obtenir une grande capacité en voies téléphoniques par satellite et des valeurs élevées de m pour abaisser la puissance du satellite.

La capacité en voies téléphoniques de chaque satellite influe grandement sur le prix de revient du secteur terrien. Si les indices de modulation sont élevés, la capacité en voies téléphoniques par satellite est faible et, par conséquent, il peut être nécessaire de disposer d'un nombre appréciable de satellites pour absorber la capacité globale en voies d'un système de télécommunication. Chaque antenne de station terrienne peut fonctionner avec un seul satellite à la fois; de sorte que pour obtenir plein accès à tous les emplacements de stations faisant partie du système, chaque emplacement devra être pourvu de plusieurs systèmes d'antenne. Par exemple, si un système

* Indice de modulation, m = excursion maximale de fréquence multivoie/fréquence la plus élevée de la bande de base avec un rapport valeur de crête/valeur efficace égal à 4.

doit avoir 50 000 voies téléphoniques dans un seul sens, avec un indice de modulation égal à dix, il faudra disposer de 10 satellites sur l'orbite. Pour utiliser à plein cette capacité, certains emplacements devraient à la limite, être pourvus de dix systèmes d'antenne de stations terriennes. Mais, si l'indice de modulation du système est 2, il suffira de trois satellites pour faire face à la demande et trois systèmes d'antenne seulement seraient nécessaires à chaque emplacement. Les économies que l'on peut réaliser sur le coût du secteur terrien sont donc beaucoup plus sensibles avec des systèmes comportant de nombreux emplacements de stations. Par conséquent, dans le cas d'un système à satellites pourvu d'un grand nombre d'emplacements de stations et de nombreuses interconnexions, le compromis sur le prix de revient conduit à utiliser de faibles indices de modulation avec des satellites à grande puissance.

Les résultats des calculs sont résumés dans les Tableaux I et II, pour les deux types de station terrienne utilisant les bandes des 4 et 6 GHz.

TABLEAU I — G/T = 40,7 dB(K^{-1}) (diamètre de l'antenne: 30 m)

	Niveau de brouillage: 1000 pWp		
	$m = 2$	$m = 4$	$m = 10$
Nombre de porteuses à fréquence radioélectrique par satellite	12	12	12
p.i.r.e. du satellite par porteuse (dBW)	32,3	24,2	12,8
Nombre de voies téléphoniques par satellite	17 900	10 800	5 000
Nombre de voies téléphoniques par porteuse à fréquence radioélectrique	1 496	900	417
Nombre de voies téléphoniques par degré d'orbite	5 180	6 230	7 270
Espacement entre satellites (degrés) requis pour satisfaire aux objectifs de bruit	3,4	1,7	0,7
Nombre de voies téléphoniques par degré d'orbite et par watt de p.i.r.e.	0,25	1,95	31,5
Nombre de voies téléphoniques par satellite et par watt de p.i.r.e.	0,87	3,29	21,8

TABLEAU II — G/T = 28 dB (K^{-1}) (diamètre de l'antenne: 10 m)

	Niveau de brouillage: 1000 pWp		
	$m = 2$	$m = 4$	$m = 10$
Nombre de porteuses à fréquence radioélectrique par satellite	12	12	12
p.i.r.e. du satellite par porteuse (dBW)	45,0	36,9	25,5
Nombre de voies téléphoniques par satellite	17 900	10 800	5 000
Nombre de voies téléphoniques par porteuse à fréquence radioélectrique	1 496	900	417
Nombre de voies téléphoniques par degré d'orbite	2 150	2 580	3 020
Espacement entre satellites (degrés) requis pour satisfaire aux objectifs de bruit	8,4	4,2	1,7
Nombre de voies téléphoniques par degré d'orbite et par watt de p.i.r.e.	0,0058	0,044	0,7
Nombre de voies téléphoniques par satellite et par watt de p.i.r.e.	0,047	0,182	1,17

RAPPORT 711-1

CRITÈRES D'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES

(Programme d'études 2J/4)

(1978-1982)

1. Introduction

L'évolution rapide du service fixe par satellite et des autres services de radiocommunications spatiales pose le problème de l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires. Cette orbite a des possibilités limitées et tous les arcs orbitaux ne conviennent pas de la même manière au positionnement des satellites. Ainsi, certains arcs sont ou seront occupés par un grand nombre de satellites fonctionnant dans divers systèmes internationaux ou nationaux qui utilisent en partage certaines bandes de fréquences. Cela étant, il est admis que l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences dans le service fixe par satellite est un objectif important, mais la question de savoir ce que représente l'utilisation efficace de la ressource qu'est l'«orbite-spectre» est un problème complexe. Il est généralement admis qu'il est souhaitable d'aborder cette question d'un point de vue plus quantitatif, mais il se peut que la complexité des trajets Terre vers espace et celle, sans cesse plus grande, des systèmes de télécommunication par satellite ne permettent pas de donner une réponse simple. Du point de vue de l'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques, il faudrait tenir compte également des contraintes imposées par l'utilisation en partage, par les services de Terre, de certaines portions du spectre. Aucun critère général d'application simple ne permet jusqu'ici de déterminer si les systèmes à satellites utilisent efficacement ou non l'orbite des satellites géostationnaires ou le spectre des fréquences radioélectriques. On a commencé à étudier la possibilité de trouver le moyen d'exprimer quantitativement, en une seule formule, l'efficacité d'utilisation de l'orbite et l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande [CCIR, 1974-78a, b et c]. Les termes employés à cet effet doivent être choisis avec soin et définis avec précision et, même ainsi, il se peut qu'il ne soit pas possible de trouver un moyen satisfaisant pour exprimer l'efficacité d'utilisation de ces ressources de façon significative et utile. Toutefois, on considère généralement que cette question demande un complément d'étude. L'un des nouveaux défis que pose cette étude tient au fait qu'elle ne concerne pas seulement l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande pour un seul système de transmission. Elle implique en fait l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande lorsqu'il faut également tenir compte d'un certain nombre de systèmes potentiellement brouilleurs fonctionnant sur une fréquence commune et utilisant l'orbite des satellites géostationnaires.

Le nombre de facteurs techniques à prendre en considération dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires donne une idée des difficultés qu'on rencontrera lorsqu'il s'agira d'élaborer une définition générale de l'efficacité. A cette question complexe viennent s'ajouter des considérations non techniques: facteurs économiques, sociaux et culturels qui sont également des aspects importants. On pourrait progresser dans le domaine technique en séparant soigneusement et en définissant avec précision des concepts qui ont été employés abusivement et de façon interchangeable dans le passé. Cette mise au point pourrait aboutir à une meilleure compréhension de la notion d'efficacité d'utilisation de l'orbite-spectre et permettrait d'adopter des Avis en la matière, avec pour effet d'améliorer l'utilisation de cette ressource. Le § 2 traite par conséquent du problème des définitions. Le § 3 étudie la notion de «mesure» de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences. Les Annexes I et II décrivent, de façon plus détaillée, deux séries de mesures qui pourraient être prises, ainsi que les méthodes de calcul correspondantes.

2. Concepts et définitions

2.1 *Critères*

Un critère est une norme qui indique ce qui est souhaitable et par référence à laquelle on mesure l'utilisation effective d'une ressource. Il serait certes souhaitable que les critères répondent à cette définition, mais tous les critères acceptables ne se prêtent pas toujours à des mesures et certains ne reflètent pas tous les facteurs pertinents imaginables. Une des difficultés pratiques dans l'utilisation d'un critère généralisé tient au fait que les différents utilisateurs ou administrations sont susceptibles d'avoir des conceptions différentes quant au critère «préféré» à utiliser.

2.2 *Rendement*

Le terme «rendement» ayant une portée générale et étant universellement accepté, il ne faudrait pas lui donner un sens trop vague dans le présent contexte. En termes très généraux:

$$\text{rendement} = \frac{\text{qualité de fonctionnement réelle}}{\text{qualité de fonctionnement idéale}}$$

Dans la plupart des applications scientifiques, il est facile de déterminer la qualité de fonctionnement idéale même s'il est impossible de l'obtenir. Toutefois, dans le contexte actuel, il convient d'évaluer la qualité de fonctionnement en fonction du critère d'exploitation. Lorsqu'on a affaire à un critère qualitatif, on ne peut exprimer numériquement ni la qualité de fonctionnement réelle ni la qualité idéale. Même avec un critère purement technique, il demeure très difficile de calculer le rendement. En effet, on peut certes calculer la qualité de fonctionnement réelle, mais la signification du mot rendement implique l'existence d'une limite théorique supérieure (la «qualité de fonctionnement idéale») qui semble être très difficile à déterminer.

Pour que cette limite soit utile (si elle existe), il faut obligatoirement que son domaine d'application s'étende à tous les cas possibles qui pourraient se présenter dans la mise en service. C'est-à-dire qu'elle doit pouvoir s'appliquer à tout système composé de satellites et de stations terriennes et qu'elle ne peut pas être tributaire d'une hypothèse particulière, quelle qu'elle soit, concernant l'utilisation de techniques telles que: interversion des fréquences assignées, liaisons inter-satellites, systèmes à plusieurs faisceaux, diversité de polarisation, etc. Dans un contexte si général, il est assurément très difficile de définir une limite théorique.

S'il est impossible d'exprimer le critère principal en termes mesurables, on ne pourra pas calculer le rendement, qui devient donc inutile dans ce contexte. Toutefois, même si on peut parfaitement définir la qualité de fonctionnement, on n'a pas encore résolu le problème de la détermination de sa limite supérieure, dont la connaissance est indispensable pour la définition du rendement.

2.3 *Mesure (de l'utilisation de l'orbite-spectre)*

Comme il a été dit plus haut, il est difficile de définir l'efficacité d'utilisation de l'orbite-spectre. Il importe toutefois de quantifier d'une manière ou d'une autre cette utilisation. Il semble que cette quantification ne puisse s'effectuer que dans un cadre technique.

Une mesure de l'utilisation de l'orbite-spectre est simplement une métrique définie en fonction de toutes les caractéristiques et conditions techniques se rapportant à un ensemble déterminé de réseaux à satellites. On pourrait par exemple avoir la métrique * suivante: «voies téléphoniques par degré d'orbite et par MHz». Une autre méthode est fondée sur le concept d'«utilité sociale» des systèmes à satellites; elle est caractérisée par le système de Terre équivalent **. Une troisième méthode consiste à mesurer l'«espacement moyen entre satellites». De toute façon, il est évident que la valeur numérique de la mesure dépendra du contexte choisi. Par exemple, dans le cas de la mise en service d'un réseau donné, la métrique donnera des nombres différents selon qu'on postulera un ensemble homogène de satellites, ou un autre ensemble, ou encore le milieu proprement dit dans lequel le satellite sera placé.

Il est certain que pour donner à la notion de mesure toute son utilité il faut en choisir une en particulier; il ne semble pas logique de choisir des mesures différentes pour des catégories d'applications différentes, et c'est précisément grâce à cette mesure particulière qu'on peut classer valablement les catégories d'utilisation de l'orbite-spectre. Si ces diverses catégories représentent des applications différentes, on pourra naturellement considérer que les différentes valeurs de la mesure sont «acceptables», selon l'application dont il s'agit.

3. Mesures de l'utilisation de l'orbite-spectre

Comme indiqué précédemment, il semble qu'en l'absence d'une définition précise de l'efficacité, le concept de «mesure» conviendrait pour évaluer les modalités d'utilisation de la ressource que constitue l'orbite-spectre.

Comme indiqué au § 2.3, une mesure est une fonctionnelle définie sur l'«espace» des facteurs techniques. Soit T_f l'ensemble des facteurs techniques pertinents. De façon symbolique, on peut représenter une mesure de M par l'équation suivante:

$$M = \mathrm{F}(T_f) \tag{1}$$

où F (.) est la fonctionnelle en question. Il est intéressant également de définir une mesure généralisée M_g :

$$M_g = \mathrm{F_g}(T_f, K_s, K_c) \tag{2}$$

où $\mathrm{F_g}$ est une fonctionnelle généralisée, K_s un facteur (ou un ensemble de facteurs) exprimant l'utilité sociale et K_c recouvre des facteurs de coût: par exemple, les frais d'établissement, de maintenance, les recettes, etc. Toutefois, puisqu'on a défini la mesure comme étant une notion technique, on limitera essentiellement l'étude à la formule (1).

---

* On emploie ici de façon assez arbitraire le terme «métrique», emprunté aux mathématiques, où il se définit comme une fonctionnelle (avec certaines propriétés) qui permet de transposer des ensembles de points d'un «espace» à un autre espace. La métrique la plus connue est naturellement celle de la distance, qui «applique» des ensembles de points sur une ligne réelle. L'utilisation qui est faite ici de ce terme implique donc l'«application» de l'«espace» de caractéristiques techniques sur un nombre, de préférence, ou éventuellement sur un ensemble de nombres.

** Par ce terme, on entend le système de Terre qu'il faudrait mettre en œuvre au lieu du système à satellites pour pouvoir établir le même nombre de voies entre deux points donnés de la surface terrestre.

Il existe un certain nombre de mesures possibles dont certaines sont énumérées ci-après:

a) le débit total des données;
b) l'espacement moyen entre satellites (ou le nombre de satellites);
c) le nombre de liaisons espace vers Terre;
d) le débit de données par MHz;
e) le débit de données par degré d'orbite et par MHz.

Ces mesures reflètent à des titres divers l'objet fondamental de la ressource et définissent les unités permettant de calculer l'utilisation de l'orbite-spectre. Tous les facteurs techniques pertinents contribuent d'une façon ou d'une autre à l'évaluation qui en résulte.

Une autre méthode de recherche consisterait à définir la mesure comme une fonction mathématique des caractéristiques techniques (pertinentes) des réseaux considérés. Examinons la fonction μ suivante, prise à titre d'exemple purement hypothétique:

$$\mu = P_t^{\alpha_1} G_t^{\alpha_2} \left|S(f)\right|^{\alpha_3} \left(\frac{G_r}{T_r}\right)^{\alpha_4} \left(\frac{1}{1+\Delta N}\right)^{\alpha_5} \left(\frac{1}{1+\Delta E}\right)^{\alpha_6} \quad (3)$$

où:

G_t : gain sur l'axe du faisceau de l'antenne d'émission;

P_t : puissance d'émission;

$S(f)$: densité moyenne de puissance spectrale calculée sur une largeur de bande de référence;

G_r : gain sur l'axe du faisceau de l'antenne de réception;

T_r : température de bruit du récepteur;

ΔN : tolérance pour le maintien en position nord-sud;

ΔE : tolérance pour le maintien en position est-ouest.

Les exposants α_i traduisent différents degrés d'importance. La formule (3) pourrait s'appliquer aussi bien à la liaison montante qu'à la liaison descendante. La mesure totale de l'utilisation sur un arc de l'orbite pourrait être la valeur moyenne $\bar{\mu}$ obtenue sur tous les réseaux. On a choisi ce type de mesure pour sa simplicité car la formule (3) est une fonction bien définie et simple des principaux facteurs techniques qui ont une influence sur l'utilisation de l'orbite-spectre. Un autre élément appréciable de cette méthode est que la mesure s'applique parfaitement à un réseau particulier, quel que soit son environnement. Cela est un grand avantage étant donné que l'une des principales difficultés, avec les autres méthodes, est la définition d'un contexte approprié pour les calculs. Toutefois, cette méthode présente aussi d'autres inconvénients qui la rendent moins avantageuse que les autres. Une première difficulté réside dans le choix des valeurs des exposants α_i. Il y en a une autre plus fondamentale encore, à savoir qu'il n'est pas toujours facile de déterminer si un facteur a tendance à faciliter ou à limiter l'utilisation de l'orbite-spectre. Pour certains facteurs, tels que G_r, il est facile d'en déterminer la tendance. Mais prenons P_t par exemple. Si tous les autres termes restent fixes dans la formule (3) et que P_t augmente, il faut que la largeur de bande augmente (pour que $S(f)$ reste constant). Ainsi, on obtient une plus grande capacité au détriment de la largeur de bande, et il n'est généralement pas possible de dire laquelle de ces variations sera la plus importante. Bien entendu, la formule (3) n'est qu'un exemple, mais on pourrait probablement trouver une formule qui ne comporte pas les difficultés susmentionnées. Même dans ce cas, le principal inconvénient est peut-être que ce type de mesure n'exprime pas l'utilisation en fonction de la ressource elle-même et qu'il est donc difficile d'apprécier la signification des nombres particuliers fournis par son évaluation.

La ressource orbite-spectre sert principalement à la transmission de l'information. Il semble donc logique de mesurer l'utilisation de l'orbite-spectre en fonction de la quantité d'information transmise par rapport à la quantité de ressource «consommée» pour transmettre cette information. Un autre facteur très important est le coût à prévoir pour l'établissement du service, ainsi que l'utilité sociale de celui-ci. La formule (2) reflète déjà ces notions, mais d'une manière très générale. Pour les besoins du calcul, il faut spécifier une relation particulière entre les variables. La formule qui semble suffisamment générale et souple pour être utilisée dans une mesure généralisée est la suivante:

$$M_g = \frac{R\ (\text{utilité sociale})^{\alpha}}{(\Delta\theta)^{\nu}\ (W)^{\mu}\ (\text{coût})^{\delta}} \quad (4)^*$$

où:

$\Delta\theta$: arc d'orbite utilisé,

W : largeur de bande occupée,

R : débit de données,

α, ν, μ, δ : facteurs de pondération relatifs.

* Il peut être utile d'observer qu'il pourrait exister des contraintes extérieures dans l'établissement de la formule (4), par exemple lorsque les bandes de fréquences sont partagées entre les services de Terre et les services de radiocommunications spatiales.

Sous cette forme, la formule (4) n'est pas encore suffisamment spécifique pour le calcul. Deux mesures obtenues à partir d'interprétations quelque peu différentes de la formule (4) sont étudiées en détail dans les Annexes I et II.

3.1 *Calcul des mesures de l'utilisation de l'orbite-spectre*

Quelle que soit la mesure adoptée, il convient d'uniformiser la méthode de calcul. Une mesure vise essentiellement à servir de guide à ceux qui réalisent des systèmes à satellites pour l'utilisation de l'orbite-spectre dans les différents types de système. Il serait donc souhaitable que la mesure puisse s'appliquer à un réseau déterminé. Toute mesure qui fait intervenir l'espacement entre satellites implique nécessairement l'existence d'un autre satellite par rapport auquel cet espacement est défini. Il faut donc définir au moins un autre réseau pour les besoins du calcul *. Il y a plusieurs façons possibles de le faire, à savoir:

a) définir un autre réseau avec un seul satellite identique au réseau à satellite considéré;

b) définir un ensemble de réseaux identiques au réseau considéré (ensemble homogène). (Une mesure fondée sur cette méthode est décrite dans l'Annexe II);

c) définir un réseau à satellite de référence qui servirait de base pour les calculs de n'importe quel autre réseau considéré. (Une mesure fondée sur cette méthode est décrite dans l'Annexe I);

d) définir un ensemble hétérogène, mais d'usage facile, d'autres réseaux, de manière à avoir un contexte plus crédible. On pourrait par exemple définir un ensemble homogène de satellites qui soit identique au réseau considéré et qui alternerait avec un second type de satellites;

e) on pourrait faire les calculs pour le milieu dans lequel le réseau examiné serait mis en service.

La méthode *e)* est probablement la plus valable mais aussi la plus complexe. Elle présente cependant comme inconvénient de ne pas tenir compte des progrès futurs. Il semble que la méthode *a)* ou la méthode *c)* pourrait fournir une base assez commode pour le calcul d'une mesure. Le principal avantage de la méthode *a)* tient à sa simplicité relative et au fait que la mesure ne reflèterait que les caractéristiques du réseau considéré, puisque l'autre réseau serait identique; son principal inconvénient est qu'elle ne fournit pas de base commune pour des réseaux différents. Cet aspect particulier est au contraire le point fort de la méthode *c)* qui, du fait qu'elle donne la même référence pour tous les réseaux, permet une comparaison plus directe des différents réseaux. Son inconvénient est que, dans le cas d'un réseau très général, il faut définir toutes les caractéristiques pertinentes de ce réseau pour pouvoir effectuer les calculs nécessaires. Par exemple, si le réseau considéré émet ou reçoit des signaux dans deux bandes de fréquences différentes, le réseau de référence doit avoir les propriétés correspondantes. Il faut définir le système de référence de façon à rendre les calculs relativement simples sans que les résultats favorisent indûment a priori tel ou tel type de réseau. Il faut donc continuer à étudier cette méthode. Ces méthodes sont examinées plus en détail dans l'Annexe III.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR

[1974-78]: **a.** 4/51 (Etats-Unis d'Amérique); **b.** 4/55 (Etats-Unis d'Amérique); **c.** 4/109 (U.R.S.S.).

ANNEXE I

1. Introduction

Le § 3 donne un critère général pour l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires:

$$M_g = \frac{R\ (\text{utilité sociale})^{\alpha}}{(\Delta\theta)^{\nu}\ (W)^{\mu}\ (\text{coût})^{\delta}} \qquad (5)$$

Dans la présente Annexe, on propose une interprétation particulière de cette égalité et on cherche en particulier à évaluer l'«utilité sociale» en calculant un système de Terre équivalent. On propose aussi une méthode permettant de tenir compte des faisceaux étroits. L'évaluation numérique de (5) pour un système proposé est faite au moyen de la méthode du réseau de référence (§ 3.1, point *c)*). Le dernier paragraphe de l'Annexe décrit un système de référence possible qui pourrait être précieux.

2. Développement général

Considérons tout d'abord le numérateur de la formule (5). L'utilité sociale d'un service par satellite projeté dépend de la distance qui sépare les stations terriennes, de la durée de la charge des voies, des types de messages – duplex ou diffusion (c'est-à-dire information destinée simultanément à un grand nombre d'utilisateurs).

---

* Cela ne s'applique pas aux mesures définies par la formule (3) qui sont uniquement des fonctions des paramètres du réseau. Toutefois, comme indiqué au paragraphe précédent, on peut avoir des doutes sur l'utilité de ces mesures.

Pour tenir compte de tous ces éléments, il est proposé que la capacité de trafic utile d'un système de télécommunication par satellite soit définie par le réseau de Terre qui serait nécessaire pour réaliser les mêmes objectifs que le système à satellite, c'est-à-dire pour fournir le même nombre de voies entre les mêmes points à la surface de la Terre. De ce fait, le numérateur de (5) peut s'écrire:

$$(NL) \text{ eq. terr.} \times B \tag{6}$$

où:

(NL) eq. terr. : est le nombre de voies-kilomètres du réseau de Terre équivalent, et

B : coefficient caractérisant le rapport du temps moyen d'occupation T_o d'une voie d'un système donné au temps moyen d'occupation d'une voie téléphonique T_o0.

Selon (6), $T_o0 \approx 2{,}5$ heures. On a donc:

$$B = T_o / T_o0 \tag{7}$$

Le coefficient B peut être supérieur à 1 dans les systèmes téléphoniques à circuits assignés en fonction de la demande ainsi que dans les systèmes de radiodiffusion sonore et télévisuelle.

Considérons maintenant le dénominateur de la formule (5). Les difficultés dans l'évaluation du coût de l'arc d'orbite occupé (c'est-à-dire de la distance nécessaire entre satellites géostationnaires) et de la largeur de bande obligent à rejeter l'examen du coût du système de télécommunication par satellite. Simultanément, la formule (6), qui définit la capacité de trafic en termes de réseaux de Terre est, dans une grande mesure, le reflet d'un facteur économique.

Il est raisonnable d'admettre que ν et μ sont égaux à 1 dans la formule (5).

En calculant $\Delta\theta$, on admettra que le satellite géostationnaire de référence se rapportant à un système de référence déterminé devrait être installé au voisinage du satellite géostationnaire du système étudié.

Les caractéristiques du système de référence doivent être choisies conformément aux indications données dans le § 3 de la présente Annexe.

Il est certain que s'il y a une distance suffisante entre le satellite géostationnaire de référence et le satellite géostationnaire considéré, il peut n'y avoir aucun brouillage mutuel, même si les antennes des satellites sont dirigées sur le même secteur de la surface terrestre. Il serait manifestement superflu et dispendieux d'imposer une distance ($\Delta\theta$) entre satellites d'un angle maximum tel (θ_m) qui éliminerait les brouillages mutuels.

Pour déterminer le taux d'occupation en un point donné d'un arc de l'orbite géostationnaire, il faut introduire un facteur d'utilisation de l'arc:

$$D(\Delta\theta) = \frac{S_b}{S_v} \tag{8}$$

où:

S_b : portion de surface terrestre interdite au rayonnement dans cette bande de fréquences, et

S_v : portion de surface terrestre visible depuis l'orbite des satellites géostationnaires.

S_v est ici défini comme la partie de la surface terrestre visible à partir de l'orbite géostationnaire, calculée au moyen de la formule type comme la surface d'un segment de sphère qui sous-tend un angle de 150°.

On peut faire une évaluation générale de l'arc total occupé en calculant une valeur moyenne de D pour tous les espacements angulaires possibles des satellites (θ):

$$\bar{D} = \frac{1}{2\theta_m} \int_{-\theta_m}^{+\theta_m} D(\theta)\, d\theta \tag{9}$$

et en définissant l'arc de l'orbite géostationnaire occupé par le système comme étant:

$$\theta_{occ} = \theta_m \cdot \bar{D} \tag{10}$$

où θ_m peut être défini d'après la condition suivante:

$$D(\theta > \theta_m) \approx 0 \tag{11}$$

$$D = \varphi_b / \varphi_v \tag{12}$$

Il est à noter que la formule (12) ne tient pas compte de la relation non linéaire (particulièrement prononcée aux contours du disque visible de la Terre) entre l'angle solide du faisceau de l'antenne et l'aire de la portion de surface terrestre correspondante. Pour appliquer les formules (5) à (12) à des cas pratiques d'ingénierie, il faut en premier lieu définir S_b, c'est-à-dire la portion interdite de la surface terrestre. En règle générale:

$$S_b = S_v - S_p \tag{13}$$

où l'aire de la surface permise, S_p, est définie comme l'aire de la portion de surface terrestre totale que peuvent desservir les stations du système de référence, dans toutes les directions possibles du faisceau d'antenne du satellite de ce système et sans dépasser une certaine valeur admissible de brouillage mutuel entre le système étudié et le système de référence. Le calcul de S_b nécessite le choix d'un certain nombre de variantes caractérisées par différents pointages de l'antenne du satellite du système de référence et par différents emplacements des stations terriennes de ce système. Il est commode de prendre pour hypothèse une ouverture de faisceau très petite (tendant vers 0) de l'antenne du satellite du système de référence afin d'éviter le passage d'une station terrienne à un autre selon la zone de couverture du système de référence. Pour les calculs, il suffit de déplacer le faisceau du système de référence le long d'une série de lignes droites (Fig. 3) passant par le centre approximatif de la zone de service du système étudié et par des points caractéristiques du contour de cette zone, et de marquer les points où les brouillages mutuels commencent à satisfaire à la norme. On joint ensuite les points limites ainsi obtenus par une ligne continue. Le territoire compris à l'intérieur de cette ligne (ou l'angle solide défini dans la formule (12)) constitue la zone interdite, c'est-à-dire S_b (ou φ_b).

En introduisant alors la formule (6) dans la formule (5) et en remplaçant $\Delta\theta$ par $\theta_m \overline{D}$, on obtient:

$$M = \frac{[(NL) \text{ eq. terr.}]\, B}{\theta_m \overline{D}\,(W)} \begin{bmatrix} \text{voies-km eq. terr.} \\ \text{degrés} \times \text{MHz} \end{bmatrix} \qquad (14)$$

On trouve dans les réf. [Kantor, 1976; Talyzin et autres, 1969; Talyzin et autres, 1970] l'indication de méthodes permettant de calculer la valeur de M.

3. Paramètres d'un système à satellites pouvant servir de référence pour l'évaluation de l'efficacité dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences

Les paramètres utilisés dans cet exemple servent uniquement à illustrer le principe décrit ici.

Gamme de fréquences: la même que pour le système étudié

Type de satellite: satellite géostationnaire

Paramètres du système:

(Le CCIR pourrait déterminer les valeurs des paramètres A, B, C et D et calculer E sur la base de satellites existants et en tenant compte de la nécessité d'assurer l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires.)

Paramètre A – p.i.r.e. maximale admissible sur la liaison montante, par unité de largeur de bande, dans la direction de l'orbite des satellites géostationnaires, émise par la station terrienne dans une direction qui forme un angle θ avec l'axe du faisceau principal:

$A = A_0 - 25 \log \theta$ dB(W/4 kHz) $1° < \theta \leqslant 48°$

$A = A_0$ dB(W/4 kHz) $\varphi_{0,5} < \theta \leqslant 1°$

$A = A_m$ dB(W/4 kHz) $0 \leqslant \theta \leqslant \varphi_{0,5}$

où:

$\varphi_{0,5}$: ouverture de faisceau du lobe principal de l'antenne à -3 dB.

Pour la bande des 6 GHz, $A_0 = 12$

$A_m = 42$

Paramètre B – Sensibilité sur la liaison montante, définie comme étant la densité spectrale minimale de la puissance brouilleuse sur l'orbite des satellites géostationnaires qui correspond, dans une voie, au brouillage maximal admis, en provenance d'une seule source.

Pour la bande des 6 GHz, $B = -168$ dB(W/(m^2 · 4 kHz)).

Paramètre C – Densité spectrale de puissance maximale produite à la surface de la Terre par les émissions du satellite.

Pour la bande des 6 GHz,

$C = -152$ dB(W/(m^2 · 4 kHz)) $0 \leqslant \delta \leqslant 5°$

$C = -152 + 0{,}5\,(\delta - 5)$ dB(W/(m^2 · 4 kHz)) $5° < \delta \leqslant 25°$

$C = -142$ dB(W/(m^2 · 4 kHz)) $25 < \delta \leqslant 90°$

où δ est l'angle d'arrivée de l'émission.

Paramètre D – Sensibilité sur le trajet descendant, définie comme étant la densité spectrale minimale de la puissance brouilleuse à la surface de la Terre, arrivant dans une direction qui forme un angle θ avec la direction du signal utile, et correspondant dans une voie au brouillage maximal admis en provenance d'une seule source.

$D = D_0 + 25 \log \theta$ dB(W/4 kHz) $\varphi_{0,5} < \theta \leqslant 48°$

$D = D_0 - 3$ dB(W/4 kHz) $0 < \theta \leqslant \varphi_{0,5}$

Pour la bande des 6 GHz, $D_0 = -208$

Antenne du satellite: faisceau étroit dans le lobe principal

Enveloppe des lobes latéraux: $G(\varphi) = G_0 - (10{,}5 + 25 \log \varphi)$ dB

Diagramme de rayonnement de l'antenne de la station terrienne: $29 - 25 \log \theta$ dB.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

KANTOR, L. Y. [1976] Novy podhod k otsenke effectivnosti ispolzovaniya geostationarnoi orbity sistemami sputnikovoi svyazi (Nouveau mode d'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'orbite géostationnaire par les systèmes de télécommunication par satellite). *Elektrosviaz*, **1**, 5-11.

TALYZIN, N. V., KANTOR, L. Y., PAYANSKY, Y. M. et MANYAKIN, E. A. [1969] Ob optimalnykh parametrakh i ekonomicheskoi effektivnosti mnogostantsionnio sistemy sputnikovoi svyazi (Caractéristiques optimales et efficacité économique d'un système de télécommunication par satellite multivoies). *Radiotekhnika*, Vol. 24, **11**, 5-13.

TALYZIN, N. V., KANTOR, L. Y. et PAYANSKY, Y. M. [1970] Ekonomicheskie aspekty uvelicheniya propusknoi sposobnosti sistemy sputnikovoi i svyazi (Aspects économiques de l'augmentation de la capacité de trafic d'un système de télécommunication par satellite). *Radiotekhnika*, Vol. 25, **1**, 3-8.

BIBLIOGRAPHIE

Efficiency of the use of the geostationary satellite orbit: Concepts and definitions. Doc. IWP 4/1/414, Etats-Unis d'Amérique (1974-1977).

Plan général de développement du réseau international dans la région Europe et Bassin méditerranéen. Paris (1966).

ANNEXE II

MÉTHODE PERMETTANT D'ÉTABLIR UNE RELATION ENTRE L'UTILISATION DE L'ORBITE ET DU SPECTRE ET LES PARAMÈTRES D'UN SYSTÈME

1. Introduction

La présente Annexe décrit une méthode générale qui peut être utilisée pour obtenir des résultats numériques représentant la relation qui existe entre l'utilisation de l'orbite et du spectre, d'une part, et les paramètres d'un système, d'autre part.

La formule (4) du texte du Rapport constitue une formule générale permettant de définir une mesure de l'orbite-spectre. Toutefois, en raison des difficultés d'évaluation des facteurs non techniques, il semble utile d'envisager une version simplifiée de la formule (4). En particulier, si on pose $\alpha = \delta = 0$, on obtient la mesure suivante:

$$M = \frac{R}{(\Delta\theta)^{\nu} (W)^{\mu}} \tag{15}$$

où ν et μ sont des exposants qui pourraient être utilisés pour exprimer la valeur relative de l'arc d'orbite et de la largeur de bande. A noter que si $\nu = 0$, la mesure se ramène à (*d*) du § 3, et que si $\mu = 0$, la mesure se ramène à (*a*). La formule (15) est simple en apparence mais on pourrait la simplifier davantage en prenant des exposants égaux à l'unité. On estime qu'avec cette simplification la mesure ne perd pas beaucoup en signification et elle est plus facile à utiliser. En outre, la simplification supprime le problème posé par le choix des valeurs appropriées à donner à ν et μ. Cela étant, il est proposé d'utiliser la formule suivante:

$$M = \frac{R}{(\Delta\theta)(W)} \tag{16}$$

comme mesure appropriée et significative de l'utilisation de l'orbite-spectre.

Il est utile de discuter brièvement ici la signification de la formule (16) pour éviter toute possibilité d'interprétation erronée. Dans la formule (16), on suppose qu'il n'existe aucune relation entre $\Delta\theta$ et W, ni surtout de relation inverse. Il est exact que si on divise $\Delta\theta$ par deux et si on double W (R est constant), M reste inchangé. Supposons qu'on se trouve effectivement dans une situation où l'on devrait doubler la largeur de bande, la conséquence étant que $\Delta\theta$ pourrait être divisé par deux (R restant inchangé); dans ce cas précis, on pourrait faire des compromis entre l'arc de l'orbite et la largeur de la bande. Or, cette relation ne répondrait pas à une hypothèse a priori, mais elle résulterait simplement des hypothèses faites pour le système et ses caractéristiques.

Un malentendu du même ordre peut surgir si on affirme que la valeur de M donnée par la formule (16) augmente lorsqu'on fait décroître la largeur de bande. Là encore, cette affirmation serait vraie si $\Delta\theta$ et R restaient inchangés. Toutefois, on ne peut généralement pas modifier l'un de ces trois paramètres sans que les deux autres soient modifiés à leur tour. L'important est que R, $\Delta\theta$ et W ne sont pas des variables indépendantes les unes des autres, lorsqu'on se donne l'ensemble des autres paramètres du réseau. En général, R est une spécification fondamentale du système. Quant à la largeur de bande W, il existe trois possibilités: elle peut être aussi spécifiée librement, sa valeur peut être limitée du fait des assignations existantes, enfin elle peut découler de la valeur de R et de l'indice de modulation. Une fois qu'on a choisi les gains d'antenne, les paramètres de modulation et les marges de brouillage, la valeur de $\Delta\theta$ en découle automatiquement. On en conclut que, dans la formule (16), les termes R, $\Delta\theta$ et W forment un ensemble cohérent de valeurs résultant de toutes les hypothèses faites.

Lorsqu'on fait l'évaluation numérique de la formule (16), on se trouve placé devant deux problèmes techniques principaux:

- calcul du rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse connaissant la géométrie du système, les p.i.r.e., les dimensions des antennes, etc.; ce problème est traité en détail dans le Rapport 455;
- calcul du bruit dans la bande de base, connaissant les rapports porteuse/brouillage et porteuse/bruit. Le Rapport 388 traite de la relation qui existe entre le bruit dans la bande de base et le rapport porteuse/brouillage.

Dans le premier de ces problèmes, les caractéristiques de modulation n'interviennent pas, mais le second dépend de la modulation des porteuses utile et brouilleuse, des paramètres de cette modulation et du type de signal. Aussi, pour plus de concision, la présente Annexe traite uniquement de la téléphonie MRF-MF.

2. Bruit dans la bande de base sous l'effet du bruit thermique

On a l'expression suivante pour le rapport signal d'essai/bruit thermique dans la voie la plus élevée de la bande de base:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_t = \left(\frac{C}{N}\right) R_t \qquad (17)$$

où:

C/N: rapport porteuse/bruit total à l'entrée du récepteur pour la liaison descendante et la liaison montante;

R_t: facteur (appelé parfois caractéristique de transfert du récepteur) qui représente l'influence de l'amélioration due à la modulation et du traitement de la bande de base; selon le cas, ce facteur peut englober ou ne pas englober la pondération psophométrique et la préaccentuation.

Il existe la relation suivante entre le bruit dans la bande de base, N_t, et la formule (17):

$$N_t = \frac{10^9}{S/N_t} \qquad \text{pW} \qquad (18)$$

On peut montrer que

$$R_t = 380\, M_{eff}^2 \left(M_{eff}\sqrt{\Lambda}+1\right) \qquad \text{pour} \quad n \geqslant 240 \qquad (19a)$$

et

$$R_t = 15\, n^{0.6}\, M_{eff}^2 \left(M_{eff}\sqrt{\Lambda}+1\right) \qquad \text{pour} \quad 12 \leqslant n < 240 \qquad (19b)$$

Dans ces expressions:

M_{eff}: indice de modulation efficace multivoie,

Λ: rapport «puissance de crête/puissance moyenne» dans la bande de base (Λ est généralement fonction de n),

n: nombre de voies par porteuse.

La formule (19) englobe aussi un avantage de préaccentuation de 4 dB ainsi qu'une pondération psophométrique de 2,5 dB; d'autre part, elle est établie sur la base de la règle de Carson pour la largeur de bande en modulation de fréquence, soit:

$$W = 8400\, n \left(M_{eff}\sqrt{\Lambda}+1\right) \qquad \text{Hz} \qquad (20)$$

3. Bruit dans la bande de base sous l'effet du brouillage

Considérons un nombre arbitraire K de voies brouilleuses. On a l'expression suivante pour le rapport signal d'essai/bruit dans la voie la plus élevée du signal utile, du fait de la $j^{ème}$ porteuse brouilleuse:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_j = \left(\frac{C}{I}\right)_j R_j \tag{21}$$

où:

$(C/I)_j$: rapport total porteuse/brouillage pour la $j^{ème}$ voie brouilleuse, pour les liaisons montante et descendante *;

R_j : caractéristique de transfert du récepteur pour la $j^{ème}$ voie brouilleuse; cette caractéristique peut englober ou ne pas englober, selon le cas, la pondération psophométrique et l'avantage dû à la préaccentuation.

Les valeurs de $(C/I)_j$ dépendent des paramètres terminaux du système utile et du système brouilleur, par exemple l'espacement des satellites, les p.i.r.e. sur la liaison montante et sur la liaison descendante, les dimensions des antennes, etc. Le Rapport 455 contient des expressions complètes qui permettent de calculer $(C/I)_j$.

Pour une voie quelconque, les valeurs de R_j dépendent des indices de modulation, de la largeur des bandes de base, de l'espacement de fréquence et du degré de préaccentuation des porteuses utiles et des porteuses brouilleuses. On peut se servir du Rapport 388 pour calculer des valeurs de R_j.

$$\text{Bruit dans la bande de base } N_{Ij} = 10^9/(S/N)_j \qquad \text{pW} \tag{22}$$

Etant donné qu'il existe une relation directe entre $(C/I)_j$ et l'espacement des satellites utiles et des satellites brouilleurs, pour un ensemble donné de paramètres des systèmes, on peut se servir de la formule (22) pour établir une relation entre l'espacement des satellites et le bruit prévu dû au brouillage.

4. Bruit total dans la bande de base

Si le rapport porteuse/bruit et le rapport porteuse/brouillage sont suffisamment élevés, avec des valeurs nominales supérieures au seuil, on peut obtenir le bruit total dans la bande de base par simple addition des diverses contributions:

$$N_T = N_t + \sum_{j=1}^{K} N_{Ij} \tag{23}$$

formule dans laquelle K désigne le nombre de contributions de brouillage.

Compte tenu des formules (17), (18), (21) et (22)

$$N_T = 10^9 \left\{ \frac{1}{(C/N)\, R_t} + \sum_{j=1}^{K} \frac{1}{(C/I)_j\, R_j} \right\} \qquad \text{pW} \tag{24}$$

Dans ce contexte, il est commode de considérer N_T comme le bruit total dans la bande de base, bien qu'il s'agisse uniquement de la somme du bruit thermique et du bruit de brouillage. Dans la pratique, il faut tenir compte également d'autres contributions possibles, par exemple le brouillage causé par les faisceaux hertziens et le bruit produit par les équipements; toutefois, ces contributions n'influent pas directement sur les compromis à prévoir pour l'utilisation de l'orbite.

La formule (24) est absolument générale. Etant donné un ensemble arbitraire de paramètres, par exemple la largeur de bande et l'espacement des satellites, on peut se servir de cette expression pour calculer la qualité de fonctionnement, (N_T), qui en résulte pour le système. Inversement, si l'on connaît N_T, on peut déterminer les valeurs des paramètres qui satisfont à la spécification. Malheureusement, cette dernière opération est difficile si l'on se place dans un cas général; le plus souvent, il faut prévoir des contraintes plus restrictives pour trouver facilement une solution.

5. Exemple: système homogène

Pour évaluer la formule (16) d'une façon systématique et ordonnée, on a choisi un contexte «homogène» (voir § 3.1, point *b)*). Les hypothèses à la base du modèle du système homogène sont les suivantes:

- l'orbite des satellites géostationnaires est entièrement occupée par des satellites équidistants;
- les émissions sont à modulation de fréquence, avec des bandes de base d'une capacité au moins égale à 240 voies en téléphonie MRF;

---

* Cela suppose que les porteuses utile et brouilleuse ont les mêmes fréquences de translation au satellite. Si tel n'est pas le cas, il faut des équations séparées pour la liaison montante et pour la liaison descendante, puisque les valeurs de R_j seront différentes.

- les faisceaux de rayonnement des antennes de tous les satellites couvrent toute la surface terrestre; ces antennes ont les mêmes caractéristiques d'émission et de modulation et elles émettent le même type de signal sur la même fréquence porteuse nominale (partage du même canal);
- toutes les stations terriennes sont identiques; les caractéristiques des lobes latéraux des antennes sont conformes aux indications contenues dans l'Avis 465;
- la propagation se fait par temps clair.

Etant donné qu'il s'agit ici de téléphonie, il convient d'adopter le paramètre «nombre de voies téléphoniques» plutôt que «débit de données». On considérera donc la mesure équivalente:

$$\ddot{n} = \frac{n}{(\Delta\theta)\,(W)}$$

$\ddot{n}$ étant le nombre de voies téléphoniques par porteuse et W la largeur de bande correspondante, comme dans la formule (20).

L'hypothèse du système homogène permet de conclure que R_j a la même valeur dans tous les réseaux. Désignons cette valeur par R_0; dans la sommation de la formule (24), R_j peut donc être remplacé par une constante qui dépend de M_{eff}. Si l'on recourt à une approximation numérique de la courbe de la Fig. 8-3-2 de l'Annexe 8-3 au Rapport de la Réunion spéciale mixte, Genève, 1971, on peut montrer que:

$$R_0 \approx 76(1 + 9{,}5\ M^3_{eff}) \text{ pour } n \geqslant 240 \text{ voies} \tag{25a}$$

$$R_0 \approx 3\ n^{0{,}6}(1 + 9{,}5\ M^3_{eff}) \text{ pour } 12 \leqslant n < 240 \text{ voies} \tag{25b}$$

Ces deux formules tiennent compte de la pondération psophométrique et de la préaccentuation CCIR.

Ensuite, il est commode de séparer les effets qui s'exercent respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante:

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left(\frac{C}{N}\right)_d \left(\frac{1}{1 + \alpha}\right) \tag{26}$$

où:

$(C/N)_d$: rapport porteuse/bruit sur la liaison descendante,

α : quotient du rapport «porteuse/bruit sur la liaison descendante» par le même rapport sur la liaison montante.

La relation entre α, $(C/N)_d$ et les paramètres terminaux s'obtient par application de la théorie élémentaire de la transmission.

Pour le brouillage:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_j = \left(\frac{C}{I}\right)_{dj} \left(\frac{1}{1 + \alpha_j}\right) \tag{27}$$

avec

$(C/I)_{dj}$: rapport porteuse/brouillage d'ordre j sur la liaison descendante,

et

α_j : quotient du rapport «porteuse liaison descendante/porteuse liaison montante» par le rapport «porteuse liaison descendante/brouillage d'ordre j».

Avec les hypothèses suivantes:

- tous les satellites sont équipés d'antennes qui assurent une couverture mondiale,
- toutes les antennes des stations terriennes ont des lobes latéraux conformes aux indications de l'Avis 465, à savoir:

$$G(\Delta\theta) = A/(\Delta\theta)^{2,5};\ (A = 10^{3,2}) \tag{28}$$ *

on montre que l'on a l'expression suivante, avec une bonne approximation:

$$\alpha_j = \alpha_0 \tag{29}$$

pour tous les cas de brouillage, où α_0 désigne le rapport entre le gain d'une antenne de station terrienne sur la liaison descendante et le gain de la même antenne sur la liaison montante.

---

* En principe, $\Delta\theta$ désigne l'angle de séparation topocentrique, mais sa valeur est très proche de celle de l'angle géocentrique; en conséquence, on considérera indifféremment l'un ou l'autre de ces angles.

Compte tenu des formules (25) et (29), on peut écrire comme suit la sommation contenue dans la formule (24):

$$\sum_{j=1}^{K} \frac{1}{(C/I)_j R_j} = \frac{1 + \alpha_0}{R_0} \sum_{j=1}^{K} \frac{1}{(C/I)_{dj}} \tag{30}$$

et d'autre part on montre que, pour des transmissions dans le même canal et avec la même polarisation, on a:

$$\sum_{j=1}^{K} \frac{1}{(C/I)_{dj}} \approx \frac{2A}{G_{0d}(\Delta\theta)^{2,5}} \sum_{k=1}^{\infty} k^{-2,5} \approx \frac{2,7\,A}{G_{0d}(\Delta\theta)^{2,5}} \tag{31}$$

où

G_{0d}: gain dans l'axe du faisceau principal de l'antenne de station terrienne sur la liaison descendante. En utilisant la relation:

$$G_{0d} = \eta(\pi D/\lambda)^2$$

dans laquelle η est le rendement de l'antenne, et en combinant les formules (26), (30) et (31) dans (24), on obtient:

$$\frac{1}{\Delta\theta} = \left\{\left(\frac{N_T}{10^9} - \frac{1 + \alpha}{(C/N)_d R_t}\right) \frac{R_0 \eta (\pi D/\lambda)^2}{2,7\,A\,(1+\alpha_0)}\right\}^{0,4} \tag{32}$$

D'après la formule (20):

$$\dot{n} = 119/(M_{eff}\sqrt{\Lambda}+1) \qquad \text{voies par MHz}$$

de sorte que la grandeur cherchée est:

$$\ddot{n} = \frac{119}{(M_{eff}\sqrt{\Lambda}+1)\,\Delta\theta} \qquad \text{voies/degré/MHz.} \tag{33}$$

En portant la formule (32) dans (33), on obtient une équation explicite qui établit une relation entre le degré d'utilisation de l'orbite et du spectre et tous les paramètres importants du système. La Fig. 1 est une représentation graphique de cette relation dans le cas particulier où $\alpha = \alpha_0 = 0$, $n \geqslant 240$ voies, $D/\lambda = 300$, $\eta = 0,5$, $N_T = 7500$, pondération psophométrique de 2,5 dB et préaccentuation CCIR.

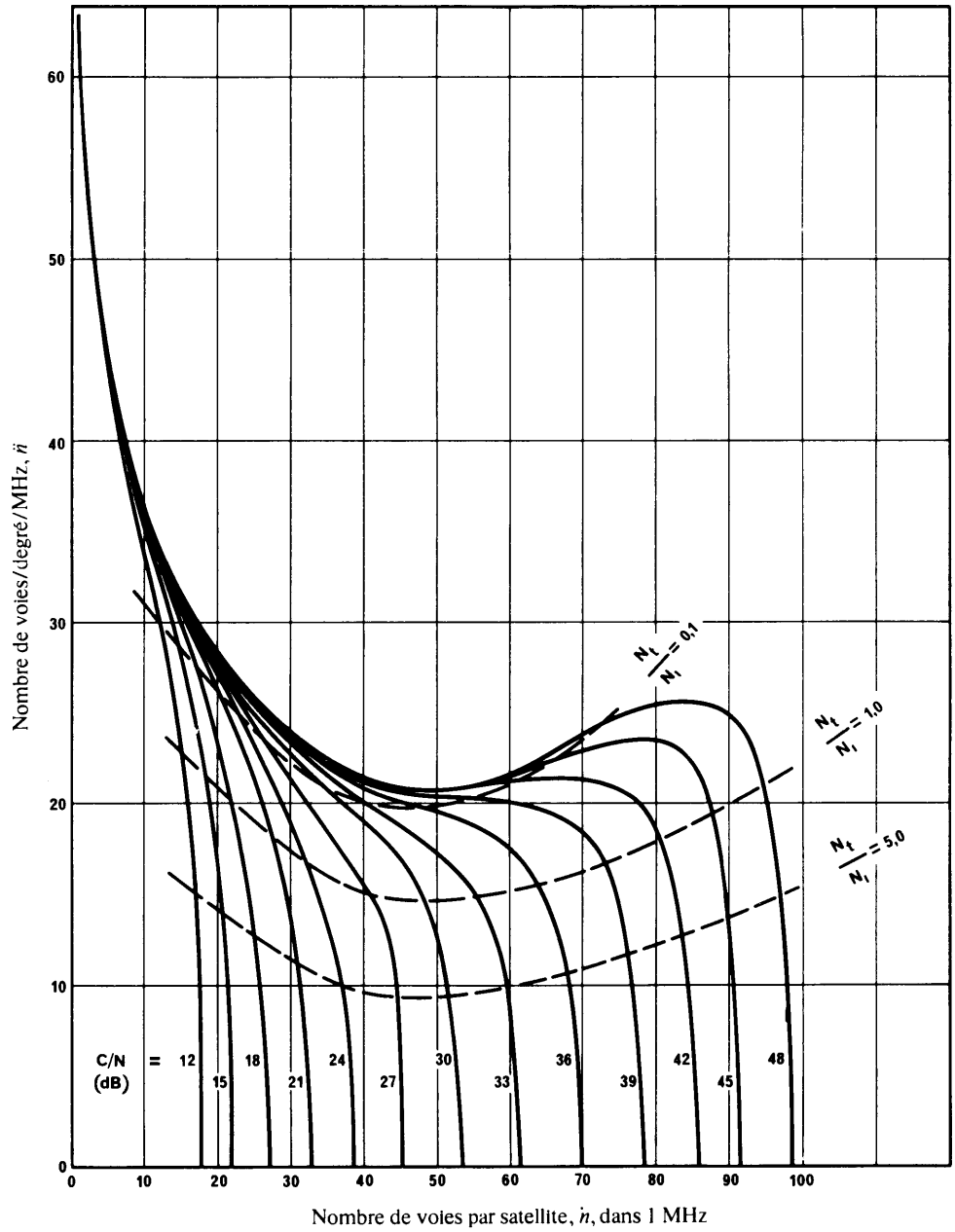


FIGURE 1 — *Utilisation de l'orbite et du spectre en fonction du nombre de voies par satellite*

($D/\lambda = 300$, $N_t + N_I = 7500$)
(On suppose que les porteuses brouilleuses sont dans la même voie)

ANNEXE III

Au § 3.1 sont décrites plusieurs méthodes de calcul possibles, permettant de mesurer l'utilisation de l'orbite-spectre. Comme indiqué dans ce paragraphe, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. La présente Annexe étudie d'une façon plus détaillée les problèmes pouvant découler de l'application de chacune de ces méthodes.

1. Faisceaux ponctuels

Les systèmes dans lesquels la zone de service n'est pas couverte par un seul faisceau d'antenne de satellite mais par plusieurs faisceaux plus étroits, chacun ne recevant que des signaux destinés aux stations de cette zone, sont dits systèmes «à service par zones».

On peut avoir deux raisons de fournir un service par zones à partir de faisceaux multiples ponctuels au lieu d'un seul faisceau large: tirer parti d'un gain d'antenne plus élevé ou faciliter la réutilisation des fréquences dans des portions adjacentes d'une zone de service encore plus grande. Dans ce dernier cas, on doit considérer que le service par zones s'applique à la zone à l'intérieur de laquelle il n'y a pas de réutilisation spatiale des fréquences dans la même polarisation. Le cas plus général où les fréquences sont réutilisées à l'intérieur d'un système exige un examen plus poussé. Dans le cadre du service par zones, qui est maintenant défini, la séparation en fréquence des différents faisceaux se fait soit avec l'émission continue de signaux (système à service parallèle), soit avec une séparation temporelle des signaux entre les différents faisceaux (système à service séquentiel). Dans un système à service par zones (parallèle ou séquentiel), chaque partie de la bande Δf_k ou du temps Δt_k est utilisée uniquement sur une partie du territoire de service, et la puissance de l'émetteur du système à l'étude peut être réduite en raison du gain d'énergie du système. Compte tenu de la directivité accrue des systèmes à satellites et de la puissance réduite de l'émetteur de rediffusion du système en cours d'évaluation, l'indice d'occupation de l'arc de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre $\overline{D}_k \cdot \theta_{mk} \cdot \Delta f$ pour le système à service par zones sera toujours quelque peu inférieur à l'indice analogique $\overline{D} \cdot \theta_m \cdot \Delta f$ pour un système sans division en zones, occupant la même largeur de bande totale et desservant la même zone. Cependant, on ne doit s'attendre à aucun gain substantiel pour ce qui concerne l'occupation de l'orbite des satellites géostationnaires du fait du service par zones, par comparaison avec un système adjacent sans service par zones.

On obtient un gain supplémentaire, dans un système à service séquentiel, du fait du caractère statistique des normes régissant les brouillages mutuels admissibles pendant un pourcentage de temps donné. Toutefois, les limites statistiques fixées dans les Avis 466, 483 et 523 pour la valeur admissible des brouillages mutuels pour divers types de signaux ne sont pas cohérentes et doivent être revues.

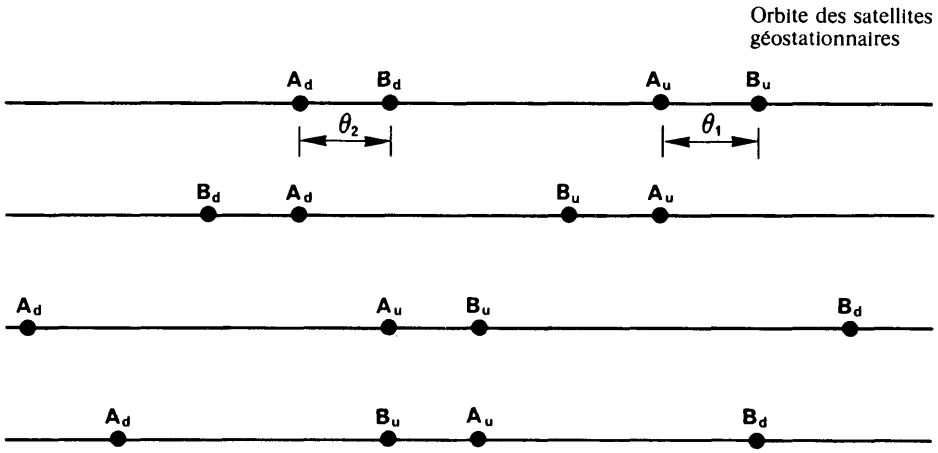
On obtient le gain le plus important lorsque le service par zones dans des systèmes voisins repose sur le même principe et lorsque l'on assure une coordination optimale soit entre leurs plans de fréquences (service parallèle), soit dans l'occupation du temps, jusqu'à obtenir une synchronisation précise des périodes T de couverture (service séquentiel). Pour évaluer l'occupation de l'arc de l'orbite des satellites géostationnaires, on peut utiliser le modèle de système de référence avec faisceaux ponctuels [CCIR, 1978-82] en définissant séparément la valeur de $S_{b1}\,\overline{D}_1\,\overline{D} \cdot \theta_m$ pour chaque zone du système par zones étudiées, ce qui permet d'obtenir une série de paramètres caractérisant l'occupation de l'orbite dans toutes les parties de la bande Δf_k pour les intervalles de temps Δt_k. Si l'on connaît les endroits interdits dans une partie donnée de la bande ou du temps, on peut en tenir compte lors de la planification du système voisin.

2. Qualité de signal

Un autre problème technique concerne la qualité de signal à adopter, soit le rapport signal/bruit soit la probabilité d'erreur. Les travaux actuels sont fondés sur une norme de qualité du CCIR, applicable aux voies téléphoniques, norme utile à conserver. Les systèmes d'une qualité supérieure n'en bénéficieraient pas, mais ceux qui ont une qualité inférieure pourraient être désavantagés par suite de l'adoption d'une méthode de mesure particulière.

3. Liaisons inter-satellites

Bien que les liaisons inter-satellites ne jouent pas encore un très grand rôle dans la pratique, elles soulèvent un problème intéressant quand on tente d'appliquer la méthode du «couple identique». Cette méthode, ainsi qu'il a été expliqué jusqu'ici, a été conçue pour s'appliquer à des réseaux. Mais, lorsqu'on utilise des liaisons inter-satellites, il faut considérer le système comme une entité de télécommunications. Ainsi, si on essaie de calculer une mesure d'utilisation pour une partie de ce système, il faut se demander quelle est la signification de cette mesure en dehors du contexte du système. On pourrait appliquer la méthode du «couple identique» au système tout entier. Toutefois, la définition du terme «identique» pose alors quelques difficultés. Soit un système composé de deux satellites A_u et A_d; le premier reçoit les signaux de la liaison montante et les transmet au second qui émet les signaux de la liaison descendante. Considérons maintenant un autre système semblable composé des satellites B_u et B_d. On peut obtenir plusieurs structures différentes, schématisées ci-après.



Toutes ces positions répondent à une certaine symétrie, mais il convient d'examiner quel est le cas «identique» et quels arcs de l'orbite sont occupés. Ainsi, pour les liaisons inter-satellites et les systèmes plus arbitraires caractérisés par une seule modalité de connexion, il faut poursuivre les études pour pouvoir évaluer correctement une mesure de l'utilisation de l'orbite-spectre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Documents du CCIR

[1978-82]: 4/329 (U.R.S.S.).

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 4G: PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LES RÉSEAUX DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET D'AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATIONS SPATIALES

Rapports

RAPPORT 560-2

CRITÈRES DE PARTAGE DES FRÉQUENCES PERMETTANT D'ASSURER LA PROTECTION DES STATIONS SPATIALES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE RECEVANT DANS LA BANDE DE 14 A 14,4 GHz

(Programme d'études 2L/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Le Programme d'études 2L/4 prévoit l'étude des critères de partage des fréquences entre le service fixe par satellite (Terre vers espace) et les services de radionavigation et de radionavigation par satellite aux fréquences de l'ordre de 14 GHz. Le présent Rapport traite des questions relatives au brouillage, causé au détriment du service assuré par les stations spatiales géostationnaires du service fixe par satellite et indique les valeurs provisoires des limites nécessaires en vue d'assurer une protection suffisante.

2. Protection des récepteurs des stations spatiales du service fixe par satellite contre le brouillage pouvant être causé par des émetteurs de radionavigation dans la bande de 14 à 14,3 GHz

Etant donné que, dans leur majorité, les émissions effectuées dans les systèmes à satellites au voisinage de 14 GHz seront des émissions à modulation par impulsions et codage, il conviendrait de spécifier la puissance du brouillage par rapport à une largeur de bande de 1 MHz. Par analogie avec des études antérieures portant sur des problèmes de partage similaires, nous nous fixerons l'objectif suivant: la puissance brouilleuse ne doit pas dépasser le dixième de la puissance du bruit thermique à l'entrée du récepteur du satellite.

Il est probable que les systèmes à satellites exploités dans ces bandes de fréquences fonctionneront avec des antennes de satellite ayant des ouvertures de faisceaux très différentes d'un cas à un autre, pour répondre à des besoins variés en ce qui concerne la couverture. Toutefois, si l'on admet que la densité moyenne de répartition géographique des émetteurs de Terre brouilleurs est la même pour des zones de couverture différentes, on peut montrer que la puissance brouilleuse totale à l'entrée d'un récepteur de satellite est indépendante de l'ouverture du faisceau d'une antenne de réception de satellite. Dans la pratique, le nombre des émetteurs brouilleurs situés dans le faisceau variera selon l'étendue et l'emplacement de la zone de couverture; il faut donc faire une hypothèse concernant une ouverture de faisceau typique pour l'antenne de satellite, et prévoir une marge suffisante pour le cas où il y aurait plusieurs possibilités de brouillage.

Dans le calcul exposé ci-après, on a considéré qu'une ouverture de faisceau de 1° de l'antenne du satellite peut servir d'exemple type:

TABLEAU I — *Calcul de la valeur admissible de la puissance surfacique brouilleuse au niveau du satellite*

Température de bruit du récepteur du satellite	1500 K
Puissance du bruit dans n'importe quelle bande de 1 MHz à l'entrée du récepteur	– 137 dBW
Puissance brouilleuse admissible à l'entrée du récepteur dans n'importe quelle bande de 1 MHz	– 147 dBW
Gain moyen de l'antenne de réception du satellite par rapport à une antenne isotrope, pour une ouverture de faisceau de 1°	43 dB
Surface équivalente S de l'antenne par rapport à 1 m²	0,5
10 log S	– 3
Valeur admissible de la puissance surfacique pour le brouillage total dans le satellite dans n'importe quelle bande de 1 MHz	– 144 dB(W/m²)
Marge pour tenir compte de plusieurs possibilités de brouillage dans n'importe quelle bande de 1 MHz	– 6 dB
Valeur admissible de la puissance surfacique au niveau du satellite, sous l'effet d'un émetteur brouilleur quelconque dans n'importe quelle bande de 1 MHz	– 150 dB(W/m²)

En évaluant la marge à prévoir pour tenir compte de plusieurs possibilités de brouillage «dans le faisceau», il convient de se fonder sur un modèle représentatif de la future utilisation de la bande de 14 à 14,3 GHz par le service de radionavigation. On prévoit que des types différents d'émetteurs de radiodétection feront appel à cette bande, y compris des émetteurs de radiodétection de faible puissance à modulation de fréquence ou à ondes entretenues destinés à la mesure de la distance ou de la vitesse. Ces applications tireraient parti de dispositifs transistorisés et de petites antennes orientées de façon aléatoire dont l'ouverture du faisceau serait de quelques degrés; cette technique pourrait se généraliser. On pourrait également utiliser des émetteurs de radiodétection à impulsions avec faisceau rotatif. On a élaboré une base d'évaluation du nombre total des possibilités simultanées de brouillage dans le faisceau de l'antenne d'un satellite géostationnaire: il s'agit d'un modèle simple dans lequel la densité moyenne de la répartition géographique des émetteurs de radiodétection de faible puissance à modulation de fréquence est de 1 pour 100 km^2, les faisceaux d'antennes, de 6° d'ouverture, étant orientés de façon aléatoire dans le plan horizontal. En se fondant sur ces hypothèses, on voit, dans l'Annexe I, que, pour une bande large de 1 MHz, il n'y aurait qu'un seul satellite dans quatre de ces faisceaux d'antenne. Le modèle élaboré, évidemment très simplifié, semble cependant justifier provisoirement une marge globale de 6 dB pour les possibilités multiples de brouillage «dans le faisceau». On tiendra naturellement compte du fait qu'il se produira aussi un grand nombre de brouillages moins intenses en dehors du faisceau.

On en conclut que, si l'on veut assurer une protection efficace au service fixe par satellite, lorsque le nombre des sources de brouillages simultanés est faible, il convient que la valeur de crête de la puissance surfacique produite en un point quelconque de l'orbite des satellites géostationnaires par tout émetteur de radionavigation fonctionnant dans la bande de 14 à 14,3 GHz ne dépasse pas -150 dB(W/m^2) dans une bande quelconque large de 1 MHz.

3. Expression de la puissance surfacique en fonction de la densité des émetteurs

Bien que la limite obtenue au § 2 ci-dessus ne suppose l'existence que de quatre sources de brouillages simultanés par MHz à l'intérieur du faisceau, elle permet la présence d'une densité géographique d'émetteurs simultanément actifs raisonnablement élevée lorsque l'on tient compte de la distribution aléatoire de leurs fréquences et des directions de leurs antennes. Cependant, il peut se faire que, dans certaines applications de radionavigation, on utilise des appareils de faible puissance correspondant à de bien plus fortes densités et, en pareil cas, la puissance surfacique limite par émetteur serait à réduire en conséquence.

En supposant comme précédemment que les antennes de radionavigation sont orientées de façon aléatoire dans le plan horizontal, le nombre de possibilités simultanées de brouillages dans le faisceau, reçus dans une bande de 1 MHz par une antenne de satellite illuminant la Terre sous un petit angle de site, est donné par l'expression:

$$n = DA\frac{\theta}{360}$$

dans laquelle D est la densité moyenne, par km^2, des émetteurs de radionavigation fonctionnant simultanément dans la bande de 1 MHz, A l'aire de la zone couverte à la surface de la Terre par l'antenne de réception du satellite (en km^2) et θ une valeur moyenne représentative pour l'ouverture de faisceau (degrés) des antennes d'émission de radionavigation.

En supposant, comme au § 2 et à l'Annexe I, que l'on prend 6° comme valeur moyenne de θ et que la zone de couverture a une aire $A = 1{,}2 \times 10^6$ km^2, on a:

$$n = D \times 2 \times 10^4$$

Par conséquent, lorsque n est supérieur à 4, la valeur maximale de la puissance surfacique de crête qu'un émetteur quelconque peut produire sur l'orbite des satellites géostationnaires serait donnée par:

$-150 - 10 \log n/4$ dB(W/m^2) dans une bande quelconque large de 1 MHz,

$-187 - 10 \log D$ dB(W/m^2) dans une bande quelconque large de 1 MHz.

L'Annexe II donne un exemple de calcul pour un émetteur de radiodétection d'un type particulier fonctionnant dans cette bande de fréquences.

4. Protection des récepteurs des stations spatiales du service fixe par satellite contre le brouillage pouvant être causé par des satellites du service de radionavigation par satellite dans la bande de 14,3 à 14,4 GHz

On peut admettre que les satellites de radionavigation utilisés dans cette bande seront des satellites géostationnaires, fonctionnant dans des systèmes du type radiosextant (voir l'Avis 361-2 (Kyoto, 1978)). On aura ici encore une valeur de -147 dBW dans n'importe quelle bande de 1 MHz (voir le Tableau I) pour la puissance brouilleuse admissible, et aussi un facteur de 6 dB pour tenir compte des possibilités de brouillage multiple. Il faut toutefois procéder d'une manière différente pour appliquer ces valeurs dans le service de radionavigation par satellite; en effet, il faut envisager une coordination entre ces services de radiocommunications spatiales plutôt qu'une valeur limite de la puissance surfacique. Nous considérons donc qu'il y a lieu d'appliquer le critère suivant dans cette procédure: la puissance brouilleuse produite par tout satellite de radionavigation à l'entrée du récepteur d'un satellite du service fixe ne devrait pas dépasser -153 dBW dans n'importe quelle bande de 1 MHz.

ANNEXE I

ÉVALUATION DU NOMBRE DE POSSIBILITÉS SIMULTANÉES DE BROUILLAGE DUES A DES ÉMETTEURS DE RADIONAVIGATION

Pour servir de base à l'évaluation de la marge à prévoir pour les possibilités simultanées de brouillage dues à des émetteurs de radionavigation, on a adopté un modèle simple où des émetteurs de radiodétection à modulation de fréquence de faible puissance fonctionnant dans la même bande nominale se trouvent répartis dans la totalité de la zone couverte par le faisceau d'antenne d'un satellite; les antennes de ces émetteurs sont orientées de façon aléatoire dans le plan horizontal. Le calcul du nombre moyen des possibilités simultanées de brouillage «dans le faisceau» se déroule comme suit:

Ouverture du faisceau de l'antenne de radiodétection	6°
Largeur de bande de l'émetteur	50 MHz
Densité moyenne de la répartition géographique des émetteurs dans la zone de couverture d'un satellite	1 pour 100 km^2
Surface approximative de la zone couverte par l'antenne d'un satellite (ouverture du faisceau: 1°)	$1{,}2 \times 10^6$ km^2
Nombre d'émetteurs dans la zone de couverture	12×10^3
Nombre d'antennes de radiodétection orientées à ± 3° d'un satellite géostationnaire	$12 \times 10^3 \times (6/360) = 200$
Nombre moyen, dans une bande large de 1 MHz, de stations de radiodétection simultanément orientées vers un satellite	$200 \times (1/50) = 4$

ANNEXE II

ÉVALUATION DE LA PUISSANCE SURFACIQUE CRÉÉE PAR UN ÉQUIPEMENT APPELÉ «ÉMETTEUR DE RADIODÉTECTION A SIFFLEMENT»

Un émetteur de radiodétection à sifflement est un appareil portatif d'une portée pouvant atteindre 3,7 km. Ses caractéristiques principales sont les suivantes:

Bande de fréquences de fonctionnement	14,0 à 14,03 GHz
Gain maximal de l'antenne	25 dB
Ouverture de faisceau – en site	10°
en azimut	3°
Puissance à l'entrée de l'antenne	−13 dBW
Signal modulant	10 Hz triangulaire
Excursion de fréquence MF	± 7,5 MHz
Puissance minimale pour que le signal soit détectable	−150 dBW dans une largeur de bande de 150 Hz.

Il est facile de voir que la p.i.r.e. maximale de l'appareil est de 12 dBW et que la puissance surfacique qui en résulte au niveau de l'orbite des satellites géostationnaires est de −151 dB(W/m^2) dans une bande de 15 MHz, valeur inférieure de quelque 10 dB à celle qui est indiquée au § 2 pour un seul signal brouilleur, dans l'hypothèse d'une transmission entre lobes principaux (la station spatiale brouillée étant vue sous un petit angle de site).

RAPPORT 872

CRITÈRES DE PARTAGE ENTRE LES LIAISONS INTER-SATELLITES RELIANT DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET DU SERVICE DE RADIONAVIGATION A 33 GHz

(Programme d'études 2S/4)

(1982)

1. Introduction

Le Rapport 451 traite des caractéristiques techniques des liaisons inter-satellites du service fixe par satellite et indique qu'il pourrait être nécessaire de disposer, à court terme, de moyens limités d'interconnexion entre satellites peu espacés fonctionnant dans les bandes comprises entre 15 et 33 GHz environ.

La CAMR-79 a attribué une bande de cette gamme de fréquences (32-33 GHz) au service inter-satellites, en partage avec le service de radionavigation.

Le présent Rapport traite des possibilités de partage entre les liaisons inter-satellites reliant des satellites géostationnaires du service fixe et le service de radionavigation.

2. Caractéristiques des liaisons inter-satellites fonctionnant dans des bandes de fréquences comprises entre 32 et 33 GHz

Les caractéristiques probables des liaisons inter-satellites fonctionnant dans la gamme de fréquences de 32 à 33 GHz sont résumées dans le Rapport 451, où les hypothèses suivantes sont posées: le nombre de ces liaisons serait probablement peu élevé; elles seraient établies sur des distances relativement petites entre satellites, afin de réduire au minimum le temps de propagation; enfin, si elles doivent être établies dans un avenir proche, elles mettraient en œuvre, dans toute la mesure du possible, les techniques spatiales existantes. Le Tableau I énumère des caractéristiques qui pourraient être représentatives de liaisons types. On suppose que les liaisons dont il s'agit ici relient des satellites à espacement orbital variable, emploient des antennes de poursuite de 2 m de diamètre et fonctionnent avec un rapport porteuse/bruit de 25 dB; les liaisons inter-satellites n'apportent par conséquent qu'une contribution relativement faible au bruit dans les voies.

Sur la base de ces valeurs, on peut évaluer les niveaux de brouillages produits ou reçus par les services de radionavigation.

La liaison spécifiée par le Tableau I ne constitue, il est vrai, que l'une des formes possibles de liaisons inter-satellites. D'autres formes de réalisation, où entrent en jeu des techniques telles que la remodulation MF, ont également été envisagées. Cependant, ces liaisons auraient une densité de puissance d'émission plus faible et, probablement, une sensibilité moindre au brouillage; on peut donc considérer que les caractéristiques décrites contiennent des facteurs de sécurité suffisants.

3. Caractéristiques du service de radionavigation fonctionnant entre 32 et 33 GHz

Il n'est pas possible de prévoir avec précision les caractéristiques techniques qui seront adoptées pour les systèmes du service de radionavigation. Il a fallu cependant poser certaines hypothèses, qui sont détaillées dans le Tableau I. On a admis par hypothèse deux gains d'antenne: l'un pour des installations au sol et l'autre pour des installations aéroportées. Il existe en outre une cause possible de brouillage dû à des émetteurs du service de radionavigation fonctionnant en mode impulsionnel, mais on a seulement tenu compte des sources d'émissions continues car ce sont elles qui produisent le brouillage le plus grave.

4. Brouillage causé au service de radionavigation par les liaisons inter-satellites

On considère ici le brouillage dû à une liaison inter-satellites en termes de puissance surfacique à la surface de la Terre.

Deux facteurs contribuent à cette puissance surfacique: le premier est la puissance par mégahertz qui attaque l'antenne de la liaison inter-satellites (P_T) et qui est proportionnelle à la longueur de cette liaison; le second est le gain en dehors de l'axe de visée de l'antenne d'émission dans la direction de la Terre, $G(\theta)$ (voir le Rapport 558). Ces facteurs dépendent de l'écart angulaire φ (voir la Fig. 1) et on peut démontrer que la puissance surfacique à la surface de la Terre (ps_{LIS}) est approximativement la suivante:

$ps_{LIS} \approx P_T(\varphi) + G(\theta) -$ (affaiblissement de dispersion) 164 (dB(W/m^2 · MHz))

$\approx$ puissance requise de la porteuse ($-113 + 1$ dB(W/MHz))

$-$ gain total des antennes (108 dBi) + affaiblissement sur le trajet

$+$ gain de l'antenne dans la direction de la Terre $-$ affaiblissement de dispersion

et, en ce qui concerne l'écart angulaire, celui-ci devient:

$$\approx -220 + 20 \log \left[\frac{8\pi\, 4{,}22 \times 10^7 \sin(\varphi/2)}{\lambda} \right] + 54 - 25 \log \left(\frac{163 - \varphi}{0{,}32} \right) - 164$$

ce qui conduit à l'expression

$$ps_{LIS} \approx 10 \log \left[\frac{8\pi\, 4{,}22 \times 10^7 \sin(\varphi/2)}{\lambda} \right]^2 - 25 \log \left(\frac{163 - \varphi}{0{,}32} \right) - 330 \qquad \text{dB (W/(m}^2 \cdot \text{MHz))}$$

La Fig. 2 illustre une estimation de la puissance surfacique à partir des caractéristiques admises par hypothèse et pour des écarts angulaires compris entre 40° et 160°. A noter que le terme ci-dessus utilisé pour le gain d'antenne en dehors de l'axe se réduit à -10 dB pour un écart angulaire de satellites, φ, de 46,6°. Cela conduit à l'aplatissement et à la discontinuité indiqués sur la Fig. 2.

5. Brouillage causé aux liaisons inter-satellites par le service de radionavigation

Le brouillage causé par le service de radionavigation dépendra principalement du gain de l'antenne de réception de la liaison inter-satellites dans la direction de la Terre, ($G(\theta)$), et de la p.i.r.e. du service de radionavigation.

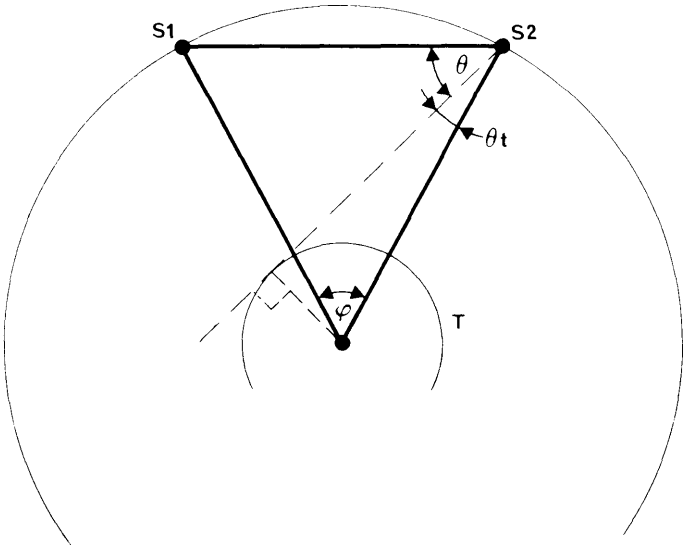


FIGURE 1 — *Liaison inter-satellites*

S1: Satellite 1
S2: Satellite 2
φ: écart angulaire
θ: angle par rapport à l'axe de visée
θ_t: angle tangentiel (valeur constante)
T: Terre.

Si on admet que la puissance totale du brouillage ne doit pas dépasser le dixième du bruit total du récepteur, un rapport porteuse/brouillage global égal à 35 dB serait acceptable (comparé à une valeur de 25 dB pour le rapport porteuse/bruit).

Dans ces conditions, la p.i.r.e. maximale (p.i.r.e.$_{RN\,max}$) du service de radionavigation peut être évaluée pour différents écarts angulaires, soit:

$$\text{p.i.r.e.}_{RN\,max} \approx \text{affaiblissement le long du trajet} - \text{valeur maximale de brouillage admissible} - G(\theta)$$

$$\approx 215 - 148 - G(\theta)$$

$$\approx 13 + 25 \log \left(\frac{163 - \varphi}{0{,}32} \right) \quad \text{dB (W/MHz)}$$

La Fig. 2 donne les valeurs de la p.i.r.e. maximale pour des écarts angulaires allant de 40° à 160°.

6. Résultats

En examinant les courbes de la Fig. 2, on voit que si on impose une certaine limite à la puissance surfacique pour protéger le service de radionavigation, il en résulte une valeur maximale de l'écart angulaire admissible pour la liaison inter-satellites. Réciproquement, en imposant une limite à l'écart angulaire maximal des liaisons inter-satellites, on obtient une valeur limite de la p.i.r.e. admissible dans le service de radionavigation.

6.1 *Liaison inter-satellites brouillant le service de radionavigation*

En admettant un gain d'antenne de 50 dB et une valeur de -139 dB(W/MHz) pour la puissance du bruit dans le service de radionavigation, on obtient une limite de -155 dB(W/(m^2 · MHz)) pour la liaison inter-satellites, ce qui entraîne un écart angulaire maximal égal à 140°.

6.2 *Service de radionavigation brouillant une liaison inter-satellites*

Compte tenu du § 6.1 ci-dessus, un écart angulaire maximal de 140° donnerait pour la p.i.r.e. composite une valeur limite égale à 60 dBW environ.

7. Conclusions

On peut conclure que les liaisons courtes (écart angulaire allant jusqu'à 90°) ne causeront pas de brouillage à l'un ou à l'autre des deux services considérés. Si les liaisons inter-satellites sont longues, elles sont plus susceptibles de causer ou de subir des brouillages; sur la base des caractéristiques hypothétiques du Tableau I, il semblerait nécessaire d'imposer une valeur limite de 140° pour l'écart angulaire. Une limite plus basse sera nécessaire dans le cas de liaisons multiples entrelacées, dont les caractéristiques devraient faire l'objet de prochaines études.

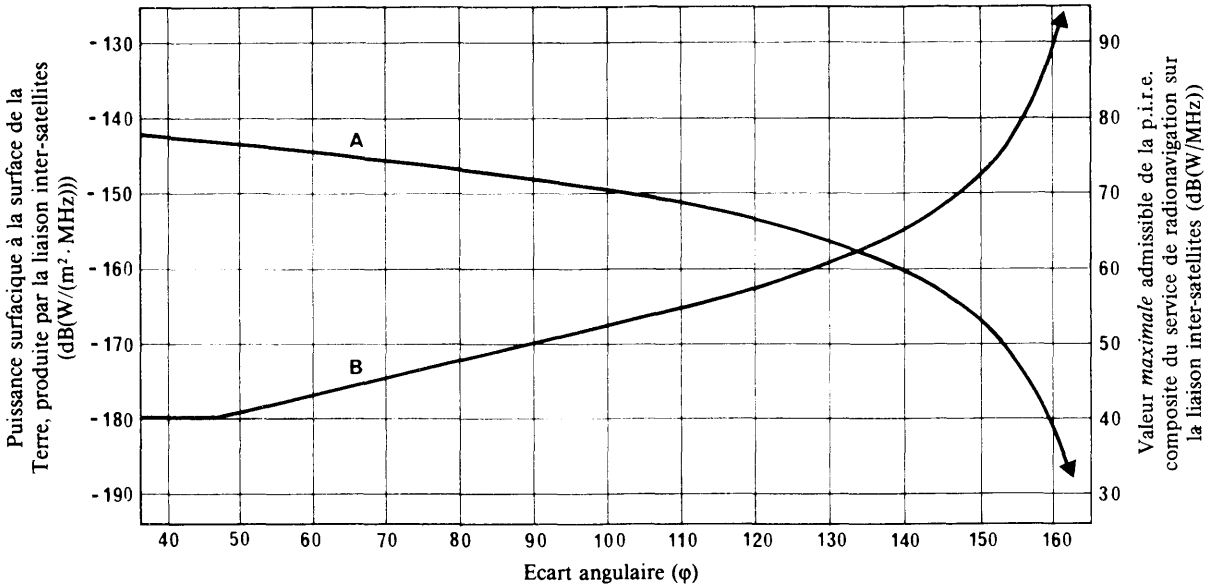


FIGURE 2 — *Critères dans le cas de brouillage entre la liaison inter-satellites et le service de radionavigation*

Courbe A: service de radionavigation brouillant la liaison inter-satellites (p.i.r.e $_{RNmax}$)
B: liaison inter-satellite brouillant le service de radionavigation (ps_{LIS})

TABLEAU I — *Caractéristiques hypothétiques d'une liaison inter-satellites (LIS) et d'un service de radionavigation (RN)*

	LIS	RN
Température de bruit du système de réception, T (K)		
10 log T	31	30
Diamètre des antennes de réception et d'émission (m)	2	–
Gain des antennes de réception et d'émission (dBi)	54	50
		35(1)
Puissance de bruit du récepteur par mégahertz (dB(W/MHz)) rapportée aux bornes de l'antenne)	– 138	– 139
Rapport porteuse/bruit (dB)	25	–
Niveau de porteuse requis à la réception (dB(W/MHz))	– 113	–
Niveau admissible maximal de brouillage, en dessous du bruit (dB)	– 10	– 10
Niveau admissible maximal du signal non désiré (dB(W/MHz))	– 148	– 149
Affaiblissement dû à la poursuite combinée (dB)	1	–
Affaiblissement sur la liaison (Terre vers espace, orbite géostationnaire) (dB)	215	–
Ouverture angulaire du faisceau (LIS) à demi-puissance (degrés)	0,32	–

(1) aéroportées.

RAPPORT 561-2

LIAISONS DE CONNEXION AVEC LES STATIONS SPATIALES DU SERVICE DE RADIODIFFUSION PAR SATELLITE

(Programme d'études 2K/4)

(1974-1978-1982)

1. Introduction

Les bandes de fréquences attribuées au service de radiodiffusion par satellite sont, par définition, des bandes utilisées dans le sens espace vers Terre. Pour les liaisons de connexion vers des satellites de radiodiffusion fonctionnant dans une bande de fréquences quelconque, il faut, aux termes du Règlement des radiocommunications actuellement en vigueur, utiliser les fréquences attribuées au service fixe par satellite pour les trajets Terre vers espace. Dans le présent Rapport, le sens des termes «service fixe par satellite» est conforme à la définition donnée dans le Règlement des radiocommunications, mais sans couvrir les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite.

La CAMR-79 a spécifiquement attribué au service de radiodiffusion par satellite, pour le sens Terre vers espace, un certain nombre de bandes de fréquences à l'usage des liaisons de connexion. Ces bandes pour les sens Terre vers espace sont les suivantes: 10,7 a 11,7 GHz (Région 1), 14,5 à 14,8 GHz (toutes Régions sauf l'Europe à l'exception de Malte) et 17,3 à 18,1 GHz (toutes Régions). A l'exception de la bande 17,3 à 17,7 GHz, ces bandes sont utilisées en partage avec d'autres services.

Cependant, les besoins en fréquence pour les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite seront probablement assez grands, en particulier au voisinage de 12 GHz; les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion peuvent être mises en œuvre dans n'importe quelle bande attribuée au service fixe par satellite Terre vers espace (sous réserve cependant d'une coordination dans les bandes qui ne sont pas désignées exclusivement à l'usage des liaisons de connexion); enfin, les bandes de fréquences les plus élevées destinées à cet usage risquent de présenter peu d'intérêt pour certaines administrations. Pour toutes ces raisons, le problème de l'utilisation, par le service fixe par satellite et le service de radiodiffusion par satellite, des bandes attribuées pour le sens Terre vers espace demeure entier.

L'utilisation simultanée de la bande 14 à 14,5 GHz par les systèmes du service de radiodiffusion par satellite fonctionnant aux alentours de 12 GHz et par le service fixe par satellite disposant de bandes différentes pour le sens espace vers Terre sera une source de difficultés dans les parties encombrées de l'orbite. En plus des services de radiodiffusion par satellite avec réception individuelle ou communautaire dans la bande des 12 GHz, on envisage la possibilité de mettre en œuvre des services «bidirectionnels» (téléphonie, données, vidéo), avec utilisation de stations terriennes ayant des antennes à petite ouverture. Il pourrait en résulter des exigences et des contraintes supplémentaires pour ces deux services.

Dans le présent Rapport, on étudie les conséquences du partage, dans le contexte de l'utilisation des bandes attribuées au service fixe par satellite pour les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion; on étudie également d'autres techniques et méthodes qui permettraient d'utiliser simultanément les liaisons de connexion nécessaires au service de radiodiffusion par satellite, tout en assurant la souplesse d'exploitation requise au service fixe par satellite, compte tenu du plan établi par la Conférence de radiodiffusion par satellite de 1977 et des dispositions techniques arrêtées par cette conférence.

2. Caractéristiques techniques et d'exploitation requises pour les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion

2.1 *Généralités*

On trouvera dans ce paragraphe l'indication de quelques caractéristiques préférées des liaisons de connexion du service fixe par satellite, du point de vue des satellites de radiodiffusion.

Les exigences imposées à ces liaisons de connexion varieront d'une bande à une autre. Il existe cependant certains impératifs de la conception des satellites qui tendront à limiter la proximité des fréquences destinées respectivement aux liaisons de connexion et aux liaisons descendantes. Il faut établir un équilibre entre les deux fréquences, afin que celles-ci ne soient ni trop proches ni trop éloignées l'une de l'autre. Avec une séparation de fréquence trop petite, il est difficile d'obtenir un filtrage efficace; d'autre part, une trop grande séparation de fréquence pose des problèmes de réalisation.

D'une manière générale, on estime que la contribution liaisons de connexion à la dégradation globale de la qualité de la liaison devrait avoir une influence minimale. Normalement, la répartition du bruit total entre la liaison de connexion et la liaison descendante sera différente pour chaque couple de bandes.

En général, il est souhaitable d'avoir une certaine latitude quant au choix de l'emplacement des stations terriennes pour les liaisons de connexion, en un point quelconque de la zone de service des liaisons descendantes. Dans certains cas, on sera aussi obligé d'utiliser des liaisons de connexion à partir de points fixes ou transportables, intérieurs ou extérieurs à la zone de service de la liaison descendante. Ce sera en particulier le cas des pays de grande superficie, s'étendant sur plusieurs zones de service correspondant à la même position orbitale, ou le cas des services régionaux de radiodiffusion par satellite.

Cette souplesse de conception a une influence sur la réutilisation des fréquences des liaisons de connexion; il existe plusieurs méthodes qui permettraient de réduire la largeur du spectre nécessaire.

Le problème du partage se trouverait simplifié si les puissances surfaciques de la liaison de connexion, au niveau de l'orbite des satellites géostationnaires, étaient uniformes. On pourrait alors utiliser une antenne de réception de satellite normalisé à gain maximal.

Si on pouvait mettre en œuvre une antenne de réception de satellite ayant la plus grande directivité techniquement réalisable, on améliorerait les possibilités de réutilisation des fréquences sur les liaisons de connexion et on réduirait à un minimum la largeur de bande nécessaire. Pour tirer parti de cette possibilité, il faudrait que la station terrienne d'émission correspondant à la liaison de connexion soit placée près du point de visée de la zone de service de la liaison descendante à partir du satellite de radiodiffusion, dans le cas où on utiliserait la même antenne de satellite pour l'émission et la réception. Quoiqu'il en soit, la zone de service de la liaison montante serait sensiblement plus petite que celle de la liaison descendante, qui peut poser des problèmes d'exploitation, ainsi que nous l'avons vu.

S'il n'est pas possible d'implanter la station terrienne de la liaison de connexion à proximité du point de visée, il pourrait être nécessaire de mettre en œuvre dans le satellite des antennes répondant à des techniques spéciales, ou même plusieurs antennes. S'il est nécessaire d'accéder au satellite à partir de plusieurs emplacements, selon un ordre déterminé dans le temps, il faudra utiliser soit des antennes de réception orientables à faisceau étroit, soit des antennes à plus faible gain (plus grande ouverture de faisceau). S'il est nécessaire d'établir simultanément des liaisons de connexion à partir de plusieurs emplacements, l'utilisation d'antennes à faisceau étroit et à gain élevé peut ne pas être possible.

Dans l'étude des liaisons de connexion, il pourra être nécessaire de tenir compte des fonctions de service (TTC) du service de radiodiffusion par satellite.

2.2 *Systèmes de radiodiffusion par satellite fonctionnant au voisinage de 12 GHz*

La CAMR-RS-77 a fixé un certain nombre de normes techniques qui affectent la transmission sur les liaisons de connexion pour les Régions 1 et 3. Une condition importante est la suivante: la diminution de qualité sur la liaison descendante, sous l'effet du bruit thermique de la liaison de connexion, est considérée comme équivalent à une dégradation du rapport porteuse/bruit de la liaison descendante ne dépassant pas 0,5 dB pendant 99% du mois le plus défavorable. Si l'on veut limiter la dégradation à cette valeur, le rapport porteuse/bruit sur la liaison de connexion doit dépasser d'environ 10 dB la valeur requise de ce rapport sur la liaison descendante: autrement dit, dans ce cas, on devrait avoir un rapport (C/N) de la liaison de connexion pouvant atteindre 24 dB, en supposant que les taux de modulation sont les mêmes.

La Conférence a aussi fixé à 30 dB le rapport de protection total pour chaque émission de satellite de radiodiffusion. Par similitude avec la répartition des caractéristiques de qualité globale, on pourrait être amené à fixer à 40 dB environ le rapport de protection total de la liaison de connexion vers un satellite de radiodiffusion, avec un rapport de protection pour un seul cas de brouillage qui pourrait atteindre 45 dB. Les normes ne sont encore fixées ni pour l'une ni pour l'autre de ces deux dernières valeurs.

On peut tirer des conclusions différentes pour la Région 2, étant donné qu'il n'existe pas encore de plan pour cette Région et que la planification de la liaison de connexion et de la liaison descendante auront lieu simultanément. Ce problème, ainsi que la question associée du brouillage dans les voies adjacentes, restent à l'étude; on trouvera des renseignements à ce sujet dans le Rapport 952.

3. Largeurs de bande nécessaires sur les liaisons de connexion

3.1 *Attributions aux trajets descendants*

La largeur de bande nécessaire pour les liaisons de connexion doit être considérée en relation avec la largeur de bande totale attribuée au service de radiodiffusion par satellite. Ces caractéristiques sont résumées dans le Tableau I.

3.2 *Réduction de la largeur de bande requise pour les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion fonctionnant dans la bande des 12 GHz*

Une grande largeur de spectre a été attribuée au service de radiodiffusion par satellite pour ses liaisons espace vers Terre et l'on prévoit qu'à l'avenir, ces bandes seront utilisées dans une large mesure pour la télévision, la réutilisation des fréquences étant réalisée au moyen d'antennes d'émission à gain élevé à bord des satellites et grâce à l'application de techniques de polarisations croisées. On réalisera sans nul doute une réutilisation des fréquences du même ordre dans le sens Terre vers espace au moyen d'antennes de réception à gain élevé à bord

TABLEAU I — *Largeur de bande attribuée au service de radiodiffusion par satellite au-dessous de 40 GHz*

Partie du spectre	Largeur de bande attribuée (MHz)
700 MHz	170
2,5 GHz	190
12 GHz	800 (Région 1) 400–600 (Région 2) 750 (Région 3)
22 GHz	450 (Régions 2 et 3)

des satellites, mais il est à craindre que cette technique ne permette pas d'augmenter sensiblement le degré de réutilisation des fréquences sur les liaisons de connexion par rapport aux liaisons descendantes, dans les parties du monde où les zones de couverture de la radiodiffusion sont relativement peu étendues. On pourrait réduire le degré d'utilisation, par les satellites de radiodiffusion, des bandes attribuées aux liaisons Terre vers espace du service fixe par satellite, si l'on réussissait à intensifier la réutilisation des fréquences sur la liaison de connexion. Il existe quatre moyens pour atteindre cet objectif:

3.2.1 *Réutilisation de fréquences sur les liaisons de connexion lorsque l'antenne d'émission de la station terrienne a une meilleure directivité qu'une antenne réceptrice de radiodiffusion*

Si le secteur spatial des systèmes de radiodiffusion par satellite desservant une zone multinationale d'étendue continentale comportait beaucoup de satellites espacés de quelques degrés sur l'orbite des satellites géostationnaires, la mesure dans laquelle les fréquences peuvent être utilisées en différentes positions sur l'orbite dépendrait, dans le cas des émissions Terre vers espace, du pouvoir de discrimination, en dehors du lobe principal, des antennes d'émission des stations terriennes et des stations de réception des satellites. Dans le cas des transmissions espace vers Terre, la réutilisation des fréquences dépend à la fois de ce pouvoir de discrimination des antennes d'émission des satellites et de celui des antennes de réception des stations terriennes, aux points terminaux de réception des émissions de radiodiffusion. On prévoit que le pouvoir de discrimination des antennes d'émission de station terrienne sera considérablement plus grand que celui de l'antenne de réception de radiodiffusion, nécessairement de petite dimension; il sera sans doute possible de réutiliser les fréquences sur une plus grande échelle pour les émissions Terre vers espace. En conséquence, la largeur de bande nécessaire sur les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion pourrait être moindre que sur la liaison descendante.

Cependant, comme indiqué au § 2, le plan adopté par la CAMR-RS-77 ne permettrait pas d'obtenir pour la liaison de connexion une réduction de largeur de bande appréciable. Cela est illustré par une étude [CCIR, 1974-78] sur l'efficacité de l'utilisation des fréquences desservant la zone du Pacifique occidental et de l'Asie dans la bande des 12 GHz. Les résultats de cette étude sont représentés à la Fig. 1. Sur cette figure, l'espacement entre satellites (φ) est considéré comme un paramètre dans le calcul sur les liaisons de connexion du rapport porteuse/brouillage (C/I) entre deux systèmes à satellites. Dans le cas où $\varphi = 0°$, la valeur de C/I est -3 dB dans le cas le plus défavorable et 49 dB dans le cas le meilleur sur l'arc d'orbite compris entre 34° E et 158° E, mais, dans la plupart des cas, C/I devient inférieur à 40 dB, niveau qui peut être considéré comme le rapport de protection requis pour la liaison de connexion; de la sorte, il est hautement nécessaire d'utiliser des liaisons de connexion différentes pour les satellites placés aux mêmes positions orbitales. Dans le cas où $\varphi = 6°$, la valeur de C/I devient supérieure à 40 dB même aux positions orbitales les plus sujettes à brouillage au voisinage de 74° E, lorsque le diamètre des antennes de station terrienne utilisées est supérieur à 4,5 m. Dans le cas de $\varphi = 12°$, le rapport C/I devient supérieur à 40 dB pour les antennes dont le diamètre est supérieur à 2,5 m ($D/\lambda > 117$ à 14 GHz) même aux positions orbitales les plus sujettes à brouillage.

Dans cette étude, on a considéré que $C/I = 40$ dB était la valeur correspondant à un seul cas de brouillage. Toutefois, comme on le voit au § 2.2, cette valeur pourrait peut-être être celle qui correspondrait à tous les cas de brouillage. De ce fait, la valeur C/I souhaitable pour un seul cas de brouillage pourrait atteindre 45 dB.

3.2.2 *Discrimination de polarisation*

Dans certains cas, il se peut que l'utilisation de la discrimination de polarisation permette une plus grande réutilisation des fréquences sur les liaisons de connexion. Les points dont il faut tenir compte sont mentionnés dans le Rapport 555. Il y a lieu de poursuivre l'étude pour déterminer la largeur de bande totale nécessaire sur les liaisons de connexion afin de réaliser les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion, compte tenu de l'avantage pouvant être procuré par la réutilisation des fréquences au moyen de la discrimination de polarisation.

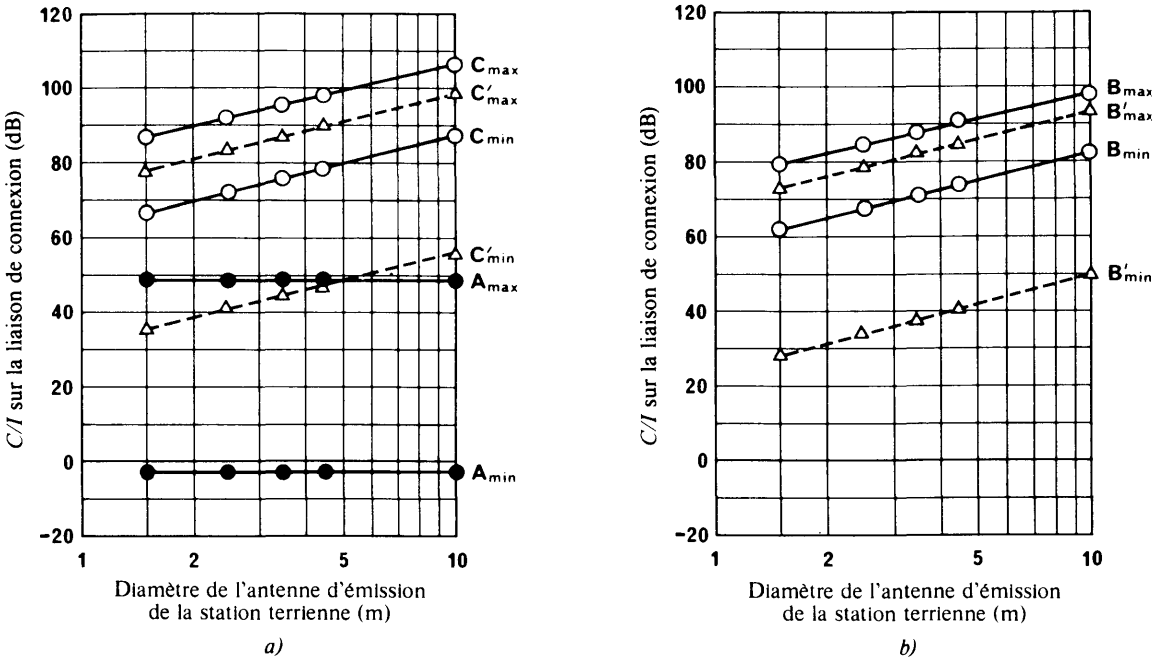


FIGURE 1 — *Rapport porteuse brouillage sur la liaison de connexion pour le service de radiodiffusion par satellite dans la bande des 12 GHz dans la zone du Pacifique occidental et de l'Asie ainsi que l'a établi la CAMR-RS-77*

A_{max}: max. C/I pour $\varphi = 0^o$, à 140° E
A_{min}: min. C/I pour $\varphi = 0^o$, à 44° E
B_{max}, B_{min}: max. et min. C/I_s pour $\varphi = 6^o$, à 128° E
B'_{max}, B'_{min}: max. et min. C/I_s pour $\varphi = 6^o$, à 74° E
C_{max}, C_{min}: max. et min. C/I_s pour $\varphi = 12^o$, à 128° E
C'_{max}, C'_{min}: max. et min. C/I_s pour $\varphi = 12^o$, à 74° E

φ: espacement entre satellites, C/I: pour une source unique de brouillage

Note. — L'emplacement sur l'orbite, la polarisation et la dimension du faisceau de rayonnement du satellite sont supposés être les mêmes que sur la liaison descendante mais les erreurs de maintien de la station en position et de pointage de l'antenne n'entrent pas en ligne de compte dans ce calcul.

Des études ont montré que, pour la Région 1, le plan de la CAMR-RS-77 concernant les liaisons descendantes pourrait être adapté aux liaisons de connexion dans la bande 17,3 à 18,1 GHz. Sous certaines conditions, une planification indépendante des positions orbitales peut être possible. Le Rapport 952 contient de plus amples renseignements à ce sujet.

3.2.3 *Autres méthodes de modulation pour la liaison de connexion*

On a procédé à une première étude de la technique de réduction de la largeur de bande nécessaire sur la liaison de connexion en recourant à la modulation à bande étroite sur la liaison de connexion avec conversion de modulation dans le satellite [Baker et Bolingbroke, 1975]. On peut obtenir d'importantes réductions de la largeur de bande sur la liaison de connexion en utilisant par exemple la modulation de fréquence à faible excursion ou la MDP polyvalente de pair avec un codage numérique et un traitement du signal vidéo. L'utilisation de la modulation de fréquence à faible excursion impliquerait toutefois un traitement du signal dans le satellite, et l'utilisation du codage numérique impliquerait une démodulation, un décodage et une remodulation dans le satellite.

L'utilisation d'une modulation plus efficace sur la liaison de connexion peut exiger des rapports de protection très élevés, rapports qui sont difficiles à obtenir dans la pratique. Par ailleurs, les signaux vidéo contiennent de nombreux éléments redondants, et on a mis au point des techniques permettant de supprimer une partie de cette redondance, sans diminution de la qualité de transmission. Ces techniques sont appelées «codage de la source». Si on appliquait ce codage sur les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion, il serait possible de réduire considérablement la largeur de bande, avec une modulation classique, et il serait inutile d'accroître le rapport de protection sur ces liaisons. L'utilisation du codage de la source, comme celle de méthodes de modulation à grande densité, exigerait un traitement du signal dans le satellite.

En règle générale, l'utilisation de méthodes de modulation de remplacement pour la liaison de connexion présente un inconvénient: augmentation de la complexité, de la masse et du coût du satellite, et diminution de sa fiabilité. L'utilisation de ces méthodes pourrait aussi retarder la mise en œuvre de systèmes de radiodiffusion par satellite dans certains cas.

3.2.4 *Systèmes fonctionnant avec intégration du son et de l'image*

Si la voie son est multiplexée dans le temps à l'intérieur du signal vidéo (par exemple, dans l'intervalle de l'impulsion de synchronisation), il est possible de réduire la largeur de bande radioélectrique totale de la porteuse modulée. Il faut poursuivre l'étude sur ce point pour déterminer l'économie de largeur de bande réalisable, ainsi que le surcroît de dépense et de complexité à prévoir pour les récepteurs de radiodiffusion.

En télévision, le son peut être transmis par une ou plusieurs sous-porteuses au-dessus du signal image. Dans la planification des liaisons de connexion, il faut tenir compte de la nécessité d'une qualité satisfaisante des voies son. Cette condition peut influer sur le rapport de protection nécessaire dans la voie adjacente.

4. Utilisation des bandes attribuées au service fixe par satellite (Terre vers espace) pour les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite

4.1 *Utilisation de la bande 14 GHz à 14,5 GHz*

Sur la base d'un exemple, on étudiera ci-après le brouillage causé par les transmissions sur une liaison de connexion du service de radiodiffusion par satellite à un satellite ayant les caractéristiques Intelsat-V; on étudiera également le cas inverse du brouillage causé par une transmission sur une liaison montante du service fixe par satellite à une liaison de connexion d'un satellite de radiodiffusion. On suppose que les signaux brouilleurs ont la même fréquence et la même polarisation.

Ci-après sont indiquées les hypothèses faites pour les deux signaux brouilleurs dans cet exemple:

Concernant les émissions Terre vers espace destinées au satellite de radiodiffusion:

Ouvertures du faisceau des antennes de satellite	1°, 2° ou 4°
Température de bruit du système de réception du satellite	3000 K
Diamètre de l'antenne d'émission de la station terrienne	2 ou 4 ou 8 mètres
Rapport porteuse/brouillage sur la liaison Terre vers espace	25 dB
Largeur de la bande des fréquences radioélectriques	27 MHz
Dispersion d'énergie	600 kHz de crête-à-crête

Ces hypothèses conduisent pour les systèmes aux paramètres suivants (à la fréquence 14 GHz):

TABLEAU II

Système de réception du satellite		Station terrienne d'émission			
Ouverture du faisceau de l'antenne	G/T en bordure du faisceau	p.i.r.e.	Puissance dans l'antenne		
			2 m	4 m	8 m
1° 2° 4°	6 (dB(K^{-1})) 0 (dB(K^{-1})) −6 (dB(K^{-1}))	72,7 dBW 78,7 dBW 84,7 dBW	380 W 1500 W 6000 W	97 W 380 W 1500 W	24 W 97 W 380 W

Concernant le système INTELSAT, trois types d'émissions représentatifs seront admis par hypothèse, avec les caractéristiques suivantes:

TABLEAU III

Type	Modulation	Capacité	p.i.r.e.	Rapport de protection
A	MRF-MF	24 voies	69 dBW	29 dB (1)
B	MRF-MF	972 voies	81 dBW	33 dB (1)
C	AMRT-MDPCQ	120 Mbit/s	82 dbW	30 dB (2)

(1) Pour produire dans la voie la plus défavorisée une puissance de bruit de 600 pW0p due au brouillage par une émission analogique de télévision à modulation de fréquence (MF).

(2) Minimum admissible pour une seule entrée de brouillage provenant d'une émission quelconque de puissance élevée contenue dans la bande occupée large de 72 MHz.

En supposant, la fréquence étant 14 GHz, la coïncidence ou l'empiètement des zones de couverture des antennes de réception de station spatiale d'un satellite de radiodiffusion et d'un satellite Intelsat-V, et en supposant de plus que les stations terriennes qui émettent à destination du satellite de radiodiffusion sont conformes au diagramme d'antenne de station terrienne établi à titre de référence par le CCIR, observer les rapports de protection requis donnés ci-dessus nécessiterait les espacements angulaires géocentriques suivants entre le satellite de radiodiffusion et un satellite Intelsat-V.

TABLEAU IV

Caractéristiques du système de radiodiffusion par satellite		Espacement des satellites pour différents types de porteuse INTELSAT sujette à brouillage		
		A	B	C
Ouverture du faisceau de l'antenne de réception du satellite	Diamètre de l'antenne de la station terrienne d'émission	24 v. MRF-MF	972 v. MRF-MF	MDPCQ 120 Mbit/s
1°	2 m	5,0°	2,4°	1,7°
	4 m	2,9°	1,4°	< 1,0°
	8 m	1,7°	< 1,0°	< 1,0°
2°	2 m	8,7°	4,2°	2,9°
	4 m	5,0°	2,4°	1,7°
	8 m	2,8°	1,4°	< 1,0°
4°	2 m	15,1°	7,2°	5,0°
	4 m	8,7°	4,2°	2,9°
	8 m	5,0°	2,4°	1,7°

Il est évident que la réduction de l'ouverture de faisceau des antennes de réception placées dans les satellites de radiodiffusion permet de réduire les brouillages; il en résulte toutefois une diminution de la zone de couverture, qui pourrait compromettre les émissions vers le satellite de radiodiffusion à partir de certaines zones situées dans les limites de la zone de service ou à l'extérieur de cette zone de service.

Selon les projets actuels de l'INTELSAT, il est prévu un nombre appréciable de porteuses MRF-MF d'une capacité de 24 voies seulement, ainsi que de nombreuses porteuses MRF-MF dont les capacités sont comprises entre 24 et 972 voies. Les espacements angulaires géocentriques requis entre un satellite de radiodiffusion et un satellite Intelsat-V sont, pour de telles porteuses, appréciables. On aurait pu les obtenir si les satellites de

radiodiffusion étaient espacés les uns des autres de deux fois les angles ci-dessus, mais il en résulterait que tout juste un emplacement de satellite du service fixe alternerait avec un emplacement de satellite de radiodiffusion. Là où il serait désirable que le rapport entre le nombre de satellites du service fixe et le nombre de satellites de radiodiffusion fût n, l'espacement entre satellites de radiodiffusion devrait être encore accru de $n - 1$ fois l'espacement requis entre les satellites du service fixe.

Avec le système INTELSAT, on pourrait tirer parti du fait que ce système ne procure actuellement qu'une couverture Terre vers espace (14 GHz) limitée et qu'il utilise pour les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite, des faisceaux de réception de satellite dont l'ouverture est inférieure à 1° et des stations terriennes d'émission dont l'antenne a un diamètre de 8 m afin d'alléger la difficulté; mais ces dispositions pourraient être une lourde sujétion imposée au service de radiodiffusion par satellite et il se peut qu'elles soient inacceptables. Une autre solution pourrait consister à aligner les plans de fréquences porteuses entre les liaisons de connexion au satellite de radiodiffusion et les porteuses Intelsat-V; ou bien encore de tenter de réaliser une certaine discrimination de polarisation sur les liaisons montantes.

D'autre part, les brouillages causés aux satellites de radiodiffusion par les stations terriennes du service fixe par satellite sont loin d'être négligeables. Avec les paramètres de la porteuse Intelsat à 972 voies et un rapport de protection requis supposé être égal à 45 dB (pour un seul cas de brouillage) sur la liaison de connexion du service de radiodiffusion par satellite, les espacements géocentriques requis entre satellites seraient à 14 GHz les suivants:

TABLEAU V

Ouverture du faisceau de réception du satellite de radiodiffusion	Espacement des satellites pour différents diamètres de la station terrienne d'émission INTELSAT		
	8 m	12 m	16 m
1° 2° 4°	11.6° 6.7° 3.8°	8.8° 5.0° 3.0°	6.8° 4.0° 2.3°

Les paramètres de système donnés dans le présent paragraphe pour le service fixe par satellite sont ceux d'INTELSAT-V. D'autres systèmes du service fixe par satellite, en particulier les systèmes destinés à fournir un service national ou régional, peuvent demander des espacements plus grands que ceux qui sont portés dans les tableaux.

Dans ce cas, en augmentant la sensibilité du récepteur d'un satellite de radiodiffusion, on accroît le brouillage qu'il peut subir de la part des émissions des stations terriennes du service fixe par satellite, ce qui peut entraîner la nécessité d'un plus grand espacement entre les satellites.

On peut conclure de ce qui précède que des brouillages pourraient se produire entre les liaisons montantes des systèmes du service fixe par satellite et les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion, en cas d'utilisation d'une bande de fréquences commune. Toutefois, des solutions spécifiques pourraient être apportées à ces problèmes de brouillage moyennant une coordination des fréquences et l'utilisation de techniques appropriées. Voir également le Rapport 952 qui traite des problèmes que posent des exemples de systèmes du service fixe par satellite qui sont plus sensibles au bruit que le système considéré. On conclut que les cas individuels de partage entre des réseaux du service fixe par satellite et des liaisons de connexion de satellites de radiodiffusion doivent faire l'objet d'un examen détaillé, compte tenu des paramètres de conception et d'exploitation du système prévu. On trouvera ci-après deux autres exemples d'études menées dans la Région 3 et dans la Région 1.

4.1.1 *Exemple 1*

Une analyse effectuée au Japon a permis de calculer les brouillages dans divers cas particuliers dans la bande 14,0 à 14,5 GHz entre les liaisons montantes des satellites fixes desservant la Région 3 (dont les caractéristiques sont indiquées dans le Rapport 561 pour le système INTELSAT-V) et les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion dans la Région 3 fonctionnant conformément au Plan de Genève pour la bande des 12 GHz. Les résultats sont les suivants [CCIR, 1978-82a];

– En ce qui concerne les paramètres techniques utilisés dans l'étude, la valeur la plus défavorable du rapport porteuse/brouillage (C/I) sur les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion subissant des brouillages causés par les liaisons montantes pour le système INTELSAT-V dans la Région de l'Océan Indien serait supérieure aux 45 dB admis pour le rapport de protection. La valeur la plus défavorable du rapport C/I des liaisons montantes pour le système INTELSAT-V subissant des brouillages causés par les liaisons de connexion au satellite de radiodiffusion serait supérieure aux 31 dB requis pour la puissance du bruit de brouillage de 400 pW0p (600 pW0p, conformément à l'Avis 466) dans un système MRF-MF à 24 voies.

- En ce qui concerne le brouillage entre les deux systèmes (station spatiale du service fixe par satellite, supposée en position à 65° E et les satellites de radiodiffusion), l'utilisation d'antenne de 15 m de diamètre aux stations terriennes du système du service fixe par satellite causerait du brouillage aux satellites de radiodiffusion occupant le segment orbital compris entre 62° E et 74° E. Par conséquent, l'espacement orbital requis pour protéger les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion pourrait prendre une valeur d'environ 10°. D'autre part, le brouillage qui serait causé à la station spatiale du service fixe par satellite, par les stations terriennes du service de radiodiffusion par satellite, ne pourrait provenir que des stations terriennes assurant la connexion aux satellites de radiodiffusion les plus proches de la station spatiale du service fixe par satellite, avec un espacement de 3°.
- Quant à la situation de brouillage entre les satellites de radiodiffusion et les satellites hypothétiques, nationaux ou sous-régionaux, du service fixe, situés au milieu des satellites de radiodiffusion, c'est le brouillage causé à ces derniers qui serait prédominant. En conséquence, l'utilisation d'antennes d'émission de 4,5 m aux stations terriennes du système fixe par satellite causerait des brouillages aux satellites de radiodiffusion séparés d'environ 30° des satellites du service fixe, les rapports de protection étant inférieurs à 45 dB.

Si on adopte des caractéristiques de transmission et des positions orbitales différentes pour le système INTELSAT-V, dont certaines pourront bientôt être employées (à une seule voie par porteuse, porteuse à 12 voies, position de 66° E de longitude, etc.), on pourra parvenir à des conclusions différentes sur l'espacement orbital requis entre satellites fixes et satellites de radiodiffusion utilisant la bande 14,0 à 14,5 GHz dans le sens Terre vers espace. Un complément d'étude est nécessaire pour tenir compte de la gamme des paramètres de systèmes à utiliser.

4.1.2 *Exemple 2*

L'étude menée par l'Administration française [CCIR, 1978-82b] était fondée sur les hypothèses suivantes: la position orbitale du satellite fixe est située entre deux satellites de radiodiffusion espacés de 6° et la zone de service du SFS chevauche partiellement avec une des zones de service du SRS. Pour cette étude et pour un ensemble donné d'hypothèses, on a conclu que même si les réseaux SFS utilisent des porteuses MRF-MF à forte capacité, il n'est possible d'assurer une protection appropriée contre les brouillages causés au SFS par les liaisons de connexion du SRS que si le satellite du SFS est placé au voisinage de quelques positions pour lesquelles le brouillage est minime. Le choix de ces positions peut entraîner des contraintes sérieuses, incompatibles avec les besoins du SFS (tel que l'arc de service). De plus, l'utilisation d'une bande en partage entre liaisons de connexion à la radiodiffusion par satellite et les liaisons montantes du service fixe par satellite, dans l'ensemble d'une région, supposerait que le partage soit faisable au moins pour certaines positions orbitales, quelles que soient les caractéristiques possibles des systèmes; or, on a vu que, dans le cas de porteuses de type monovoie ou à faible capacité du SFS, il n'est pas possible de trouver une position qui convienne.

4.2 *Utilisation de bandes de fréquences supérieures à la bande 14,0 à 14,5 GHz*

Deux bandes de fréquences ont été attribuées aux liaisons de connexion du SRS: 14,5 à 14,8 GHz et 17,3 à 18,1 GHz. Dans les parties très pluvieuses de la Région 3, des conditions de propagation défavorables peuvent rendre indésirable l'utilisation de la bande 17,3 à 18,1 GHz. Il se peut aussi que la capacité de la bande 14,5 à 14,8 GHz ne suffise pas à tous les besoins de liaisons de connexion.

5. Utilisation de bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite (espace vers Terre) pour les liaisons de connexion du service de radiodiffusion par satellite

Si l'on décidait de suivre la méthode des directions opposées comme pour la bande 10,7 à 11,7 GHz en Région 1, c'est-à-dire d'assigner aux liaisons de connexion de la radiodiffusion des fréquences dans une bande espace vers Terre attribuée au service fixe par satellite, il en résulterait les modes suivants de brouillage:

a) brouillage causé par les stations spatiales du service fixe par satellite aux stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite;
b) brouillage causé par les stations terriennes émettant à destination des satellites de radiodiffusion aux stations terriennes qui reçoivent les émissions des satellites du service fixe par satellite.

Concernant le brouillage *a)*, on peut admettre les paramètres d'une liaison de connexion à un satellite de radiodiffusion qui ont été introduits précédemment et qui sont conduits à évaluer à −95 dBW, à l'entrée du récepteur du satellite de radiodiffusion, la puissance de la porteuse utile. En admettant qu'un rapport de protection de la liaison de connexion de 45 dB serait nécessaire, il faut que la puissance de brouillage à l'entrée du récepteur du satellite de radiodiffusion ne dépasse pas le niveau de −140 dBW. L'affaiblissement net entre la sortie d'une station spatiale brouilleuse du service fixe par satellite et le récepteur du satellite de radiodiffusion est

l'affaiblissement en espace libre A entre les deux stations spatiales, diminué de la somme des gains d'antenne ΣG (gain de l'antenne d'émission du satellite du service fixe; gain de l'antenne de réception du satellite de radiodiffusion) des stations spatiales des deux sortes à un angle d'au moins 70° hors des directions de leurs faisceaux principaux respectifs. L'inégalité suivante s'applique:

$$P_{FS} + \Sigma G(70^\circ) - A(\varphi) \leqslant -140 \text{ dBW} \tag{1}$$

qui, avec

$$A = 90 + 20 \log f_{\text{MHz}} + 20 \log \varphi^\circ \qquad \text{dB} \tag{2}$$

et l'hypothèse que $f = 11\,000$ MHz conduit à la formule suivante pour la valeur minimale de φ, la séparation angulaire des satellites, avec les deux variables P_{FS} (puissance disponible de la porteuse au terminal de l'antenne d'émission du satellite du service fixe) et ΣG:

$$\log \varphi = \frac{P_{FS} + \Sigma G - 31}{20} \tag{3}$$

Le tableau VI ci-après montre la relation entre φ (en degrés), P_{FS} (en dBW) et ΣG (en dB):

TABLEAU VI

P_{FS} (dBW)	ΣG (dB)		
	0	10	20
0	0,03°	0,09°	0,3°
5	0,05°	0,16°	0,5°
10	0,09°	0,3°	0,9°
15	0,16°	0,5°	1,6°
20	0,3°	0,9°	2,8°

On peut constater que, même si la puissance disponible de la porteuse du satellite du service fixe est 100 W (20 dBW) et si le gain total mixte des antennes est 20 dB, un espacement de moins de 3° serait requis entre satellites.

Par exemple, la puissance disponible de la porteuse d'Intelsat-V est 10 W (10 dBW), et il devrait être possible sans difficulté de maintenir le gain total mixte des antennes entre les deux stations spatiales à une valeur inférieure à 10 dB environ, de sorte qu'un espacement entre satellites d'environ 3/10 de degré serait praticable. Cela correspond à une distance linéaire d'environ 230 km. Puisque les différences entre altitudes d'orbites entre deux stations spatiales peuvent de temps à autre devenir appréciables (quelquefois jusqu'à 75 km), il faudrait en pratique maintenir un espacement suffisamment grand de façon à ne pas produire des situations géométriques défavorables des engins spatiaux l'un par rapport à l'autre; du fait de ces situations, l'une des stations spatiales pourrait se trouver placée dans une région où, d'après le diagramme du rayonnement de l'antenne de l'autre, le gain est un peu plus élevé; cependant, un espacement minimal de 0,3° semble devoir garantir la sécurité.

Concernant les brouillages qui peuvent être causés aux stations terriennes de réception du service fixe par satellite par les stations terriennes qui émettent à destination des satellites de radiodiffusion, il est évident que des stations terriennes des deux types ne pourraient pas être situées en un même lieu. D'une façon générale, il est possible de choisir leurs emplacements relatifs de façon à éviter que l'intersection des faisceaux principaux et celle des premiers lobes latéraux soient situées dans la troposphère, et à maintenir le gain d'antenne de chaque station vers l'horizon, dans la direction de l'autre station, à un niveau inférieur de 10 dB au gain isotrope. Cela restreindra quelque peu le choix des emplacements possibles des stations terriennes; cette restriction ne causera que des difficultés mineures dans les pays situés sous des latitudes élevées.

Considérons de nouveau les trois types de porteuse utilisées précédemment pour le système INTELSAT-V stipulant que les rapports de protection applicables pourraient être réduits de 10 dB pendant 0,01% du temps, supposons de plus que la température de bruit du système de réception de la station terrienne est 150 K, que le rapport nominal porteuse espace vers Terre/bruit thermique requis est 19 dB pour les porteuses MF-MRF et de

25 dB pour AMRT; on obtient ainsi les valeurs suivantes pour l'affaiblissement fondamental de transmission (en dB) requis entre les deux emplacements, affaiblissement dépassé pendant tout le temps sauf 0,01% de celui-ci, pour diverses valeurs de la puissance de l'émetteur de la station terrienne de la liaison de connexion du satellite de radiodiffusion:

TABLEAU VII

Type de porteuse INTELSAT	Puissance de l'émetteur de la station terrienne de la liaison de connexion du satellite de radiodiffusion				
	22 W	90 W	350 W	1400 W	5600 W
24 voies MRF-MF	140 dB	146 dB	152 dB	158 dB	164 dB
972 voies MRF-MF	131 dB	137 dB	143 dB	149 dB	155 dB
120 Mbit/s MDPCQ	119 dB	125 dB	131 dB	137 dB	143 dB

On démontre que presque toutes ces valeurs de l'affaiblissement requis (0,01% du temps) conduiraient à des distances de séparation des emplacements inférieures à 100 km, et à beaucoup moins dans certains cas. Si, de plus, un effet d'écran permettait de bénéficier d'un supplément d'isolement entre les emplacements, les distances de séparation nécessaires seraient encore plus courtes.

Il faut poursuivre l'étude pour voir quels peuvent être les effets, sur les faisceaux hertziens, des propositions relatives aux systèmes spatiaux (liaisons montantes et liaisons descendantes) fonctionnant dans des bandes utilisées en partage avec les services de Terre. De plus, il faudra déterminer si ce mode d'utilisation crée des contraintes pour l'exploitation sur les liaisons de connexion vers des satellites de radiodiffusion.

6. Conclusions

On a montré dans ce Rapport que, si on cherche à satisfaire une grande partie des besoins du service de radiodiffusion par satellite en matière de liaisons de connexion compte tenu éventuellement du Plan de radiodiffusion par satellite, dans une des bandes attribuées actuellement au service fixe par satellite pour le sens Terre vers espace, il pourra en résulter des contraintes mutuelles sévères de chacun des deux services l'un sur l'autre. En effet:

- les exigences imposées aux liaisons de connexion pour l'application du Plan doivent être les mêmes que pour les liaisons descendantes. En conséquence, le nombre nécessaire de voies sur les liaisons de connexion doit être du même ordre que sur les liaisons descendantes, mais il peut être plus grand, et les positions orbitales ne sont pas soumises à choix;
- il sera peut-être nécessaire de prévoir des rapports de protection élevés sur les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion; d'autre part, les espacements entre satellites pourront être importants;
- il sera peut-être impossible de mettre à la disposition de l'un ou l'autre de ces deux services certaines positions orbitales et/ou certains canaux radioélectriques;
- les procédures de coordination entre réseaux, appliquées pour les attributions «Terre vers espace» du service fixe par satellite qui ne sont pas affectées expressément aux liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion, ne seront pas toujours compatibles avec les dispositions du Plan ou les options de mise en œuvre.

Il apparaît donc nécessaire d'étudier des solutions techniques qui permettraient de réduire ou de supprimer ces difficultés, compte tenu des restrictions, qui sont appliquées actuellement ou qui le seront dans l'avenir proche, à la mise en œuvre de ces solutions. Celles-ci nécessiteraient l'étude de techniques propres à réduire au minimum les largeurs de bande nécessaires sur les liaisons de connexion.

Parmi les techniques permettant de réduire la largeur de bande, on a relevé les techniques suivantes:

- compression du spectre par l'utilisation de transmissions à grande densité sur la liaison de connexion (faible taux de modulation et/ou codage de la source). Ces méthodes exigent un traitement des signaux dans le satellite; elles auront une influence sur la complexité du satellite et sur la fiabilité et le coût des systèmes;
- réutilisation accrue des fréquences, moyennant l'utilisation minutieuse de techniques de protection améliorées, par exemple la discrimination de polarisation et/ou de régulation du gain et des lobes latéraux des antennes de station terrienne et de station spatiale. On pense que ces méthodes n'entraîneraient pas un très grand accroissement des coûts si on les appliquait à un seul système d'antenne ou à un très petit nombre de systèmes d'antenne.

Il existe aussi des «stratégies» et techniques qui permettent de réduire l'influence sur les bandes attribuées au service fixe par satellite pour les transmissions Terre vers espace. Une de ces techniques qui mérite un regain d'intérêt est le partage avec le service fixe par satellite dans des bandes de fréquences attribuées à ce dernier pour les transmissions espace vers Terre. Toutefois, dans la mesure où ces bandes seraient attribuées également à des services de Terre, on créerait ainsi un nombre relativement grand de «jonctions» de brouillage. L'établissement de critères de partage appropriés demande des études complémentaires.

On pourrait réduire les conséquences subies par le service fixe par satellite si les liaisons de connexion vers les satellites de radiodiffusion utilisaient les bandes attribuées à cet effet, comme indiqué dans l'introduction du présent Rapport.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKER, A. E. et BOLINGBROKE, P. J. [7-10 avril 1975] Earth-to-space links for broadcasting satellites. IEE Conf. Publ. 126. IEE Conference on Satellite-Communication-Systems Technology, Londres, Royaume-Uni.

Documents du CCIR

[1974-78]: 4/289 (Etats-Unis d'Amérique).

[1978-82]: **a.** 10-11S/20 (Japon); **b.** 10-11S/69 (France).

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1974-78]: **a.** 4/237 (Japon); **b.** 11/387 (Pays-Bas).

RAPPORT 712-1

FACTEURS RELATIFS A LA PROTECTION DES STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE, FONCTIONNANT DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES ADJACENTES, CONTRE LES ÉMISSIONS NON DÉSIRÉES PROVENANT DE SATELLITES DE RADIODIFFUSION FONCTIONNANT DANS DES BANDES SITUÉES AUX ENVIRONS DE 12 GHz

(Question 25/4)

(1978-1982)

1. Considérations générales

La forte p.i.r.e. d'une station spatiale, nécessaire pour la réception individuelle dans les services de radiodiffusion par satellite, peut provoquer une quantité importante d'émissions non désirées sur des fréquences extérieures au canal occupé par l'émission d'un satellite de radiodiffusion. Pour les canaux de radiodiffusion par satellite les plus proches des extrémités de la bande attribuée, ces émissions non désirées risquent de provoquer des puissances surfaciques, dans la direction d'une station terrienne du service fixe par satellite fonctionnant près des extrémités des bandes adjacentes du service fixe par satellite, qui peuvent notablement dépasser les niveaux acceptables de brouillage causé à la station terrienne.

Le fait que les niveaux des émissions non désirées causent ou non un brouillage inacceptable aux stations terriennes du service fixe par satellite dépend d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels:

- l'espacement orbital entre les services de radiodiffusion par satellite et fixe par satellite et la discrimination d'antenne correspondante de la station terrienne du service fixe par satellite qui peut être atteinte;
- le niveau de filtrage dans l'émetteur du service de radiodiffusion par satellite et le récepteur de la station terrienne qui peut être obtenu dans la pratique;
- la séparation en fréquence entre les canaux proches de la fréquence séparant les attributions;
- le critère de brouillage utilisé lorsqu'on définit la valeur maximale admissible de la puissance surfacique spectrale; et
- d'autres facteurs procurant un découplage comme la discrimination de l'antenne du satellite.

2. Niveaux estimés des émissions non désirées provenant de satellites de radiodiffusion à 12 GHz

Le Rapport 807 traite des diverses sources d'émissions non désirées provenant des satellites de radiodiffusion à 12 GHz. La Fig. 1 reproduit deux courbes tirées de ce Rapport, à partir desquelles on peut évaluer les niveaux, dans les cas les plus défavorables, de la puissance surfacique spectrale produite par ces rayonnements, en fonction de la différence des fréquences provenant du centre d'un canal de radiodiffusion par satellite. Les valeurs

de la puissance surfacique spectrale indiquées dans la Fig. 1 correspondent à une p.i.r.e. de 69 dBW rayonnée par le satellite de radiodiffusion dans l'axe du faisceau. Par contre, les valeurs de la p.i.r.e. correspondant à 90% environ des assignations de fréquence faites dans le Plan de radiodiffusion par satellite pour les Régions 1 et 3 sont comprises dans l'intervalle 64 ± 1,5 dBW. Il faut tenir compte de ce fait lorsqu'on interprète les données présentées dans les Fig. 4 à 7, ainsi que les exemples de séparation orbitale et d'espacement de fréquences présentés au § 5. Pour déterminer laquelle des deux courbes pourrait représenter correctement les conditions d'exploitation, il convient de poursuivre l'étude sur la question. Le signal utilisé dans les calculs de la courbe A de la Fig. 1 consiste en barres de couleur saturées à 100%: un signal de ce type n'est jamais utilisé en exploitation normale.

Cependant, des mesures effectuées récemment à l'aide d'un signal de bande de base NTSC à barre de couleur de 75% sans filtrage des radiofréquences, et dont il est rendu compte dans l'Annexe I au Rapport 807, indiquent que les émissions non désirées en provenance d'une voie de radiodiffusion par satellite à 27 MHz donnant lieu à des excursions de crête comprises entre 5,3 MHz et 16,8 MHz paraissent sensiblement plus importantes que ne l'indique la Fig. 1. Ces mesures et les effets des brouillages sur le service fixe par satellite exigent un complément d'étude urgent.

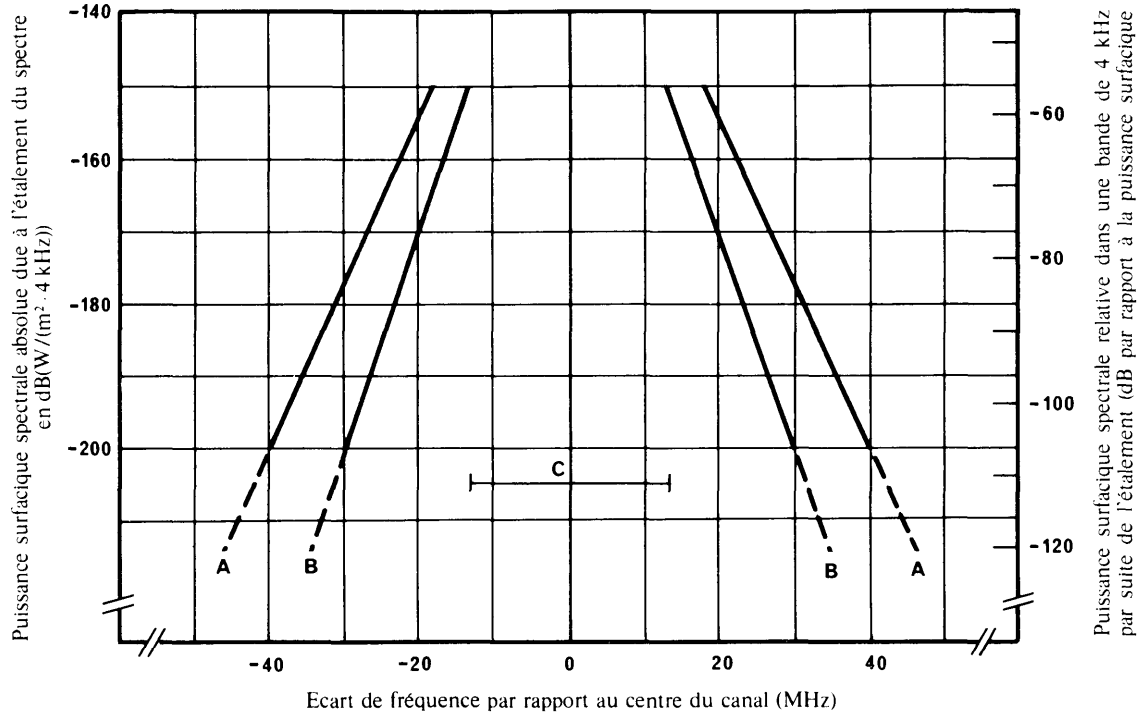


FIGURE 1 — *Enveloppes hors bande types du spectre des fréquences radioélectriques rayonnées par un satellite de radiodiffusion (télévision)*

A: Enveloppe pour un signal de bande de base de barre de couleur, modulation à 100% et sans composante continue
B: Enveloppe pour un signal d'insertion de la ligne 330, modulateur sans composante continue
C: Largeur de bande nominale du canal (27 MHz)

Note 1. — Pour l'échelle de gauche, on suppose que la p.i.r.e. du satellite correspond à une puissance surfacique de −94 dB(W/m²) dans l'axe du faisceau, la porteuse n'étant pas modulée.

Note 2. — On suppose que la dispersion d'énergie est de ±7,9 kHz au minimum.

Note 3. — On suppose une préaccentuation selon spécification du CCIR (Avis 405).

3. Niveau maximal admissible de puissance surfacique spectrale, dans les cas les plus défavorables, à l'entrée des récepteurs brouillés

Des exemples de systèmes fixes par satellite fonctionnant dans les bandes adjacentes à la bande de 11,7 à 12,5 GHz (bande attribuée au service de radiodiffusion par satellite dans la Région 1) figurent au Tableau I ainsi que les calculs de la valeur maximale admissible, dans les cas les plus défavorables, de la puissance surfacique au récepteur brouillé de la station terrienne du service fixe par satellite. Le critère utilisé dans ces calculs a été le suivant: le niveau de brouillage global par les émissions non désirées doit être inférieur de 10 dB à celui du bruit thermique du système brouillé. Les avantages pouvant résulter des propriétés de directivité de l'antenne n'ont pas

été pris en considération dans les calculs. En outre, il n'a pas été tenu compte de la forme spectrale soit des émissions non désirées, soit du signal reçu brouillé. Dans ces hypothèses, la valeur maximale admissible de la puissance surfacique spectrale des émissions non désirées dans la bande située au-dessous de 11,7 GHz est d'environ -200 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) pour un signal du service fixe par satellite à bande étroite et de -195 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) pour une liaison de connexion à un satellite maritime. Dans la bande située au-dessus de 12,5 GHz, la limite est de -171 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) pour une liaison par satellite pour données à bande étroite. La fréquence à laquelle la valeur maximale de la puissance surfacique provenant du satellite de radiodiffusion est spécifiée, sera appelée la «fréquence protégée». Pour des signaux à bande étroite, ce sera la fréquence du centre du canal à bande étroite du service fixe par satellite en question.

Lorsqu'on considère l'utilisation de signaux à bande étroite dans la partie supérieure de la bande de 10,7 à 11,7 GHz, on peut appliquer directement la valeur maximale admissible susmentionnée de puissance surfacique spectrale. Cependant, lorsque des porteuses à large bande sont utilisées dans la partie supérieure de la bande de 10,7 à 11,7 GHz, la réduction relativement rapide des émissions hors bande provenant des stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite a tendance à réduire l'effet du brouillage de ces porteuses.

TABLEAU I — *Exemples de systèmes exploités dans les bandes de 10,7 à 11,7 GHz et 12,5 à 12,75 GHz dans la Région 1 et des limites à imposer à la puissance surfacique maximale des émissions non désirées en provenance de satellites de radiodiffusion afin de protéger ces systèmes*

Caractéristique	Système		
	10,7 à 11,7 GHz		12,5 à 12,75 GHz
	Liaison satellite maritime vers station terrienne	Liaison satellite fixe vers station terrienne	Liaison satellite fixe vers station terrienne (porteuse de données)
Constante de Boltzmann en dB(W/(Hz-K)	– 228,6	– 228,6	– 228,6
Température de bruit du récepteur (K)	300	100	100(2)
Niveau de bruit thermique à la réception (dB(W/4 kHz)) (1)	– 167,6	– 172,6	– 172,6
Niveau maximal de brouillage au récepteur dans une bande de 4 kHz (dB(W/4 kHz))	– 177,6	– 182,6	– 182,6
Gain de l'antenne de réception (dB)	60	60	45,8
Puissance surfacique maximale admissible au récepteur brouillé en dB(W/m^2 · 4 kHz)	–194,6	– 199,6	–185,4

(1) On admet un niveau de brouillage de 10 dB au-dessous du niveau du bruit thermique.

(2) Ces valeurs de la température de bruit de système sont à la limite de ce qui est réalisable actuellement. Certaines applications actuelles peuvent présenter des valeurs de température de bruit plus élevées.

A titre d'exemple d'un système à large bande fonctionnant dans la bande de 10,7 à 11,7 GHz, des calculs ont été effectués pour une porteuse de 20 MHz, transmettant 612 voies, utilisée dans le système INTELSAT.

Dans ces calculs, on a admis par hypothèse qu'une contribution effective unique de bruit de brouillage d'environ 500 pW0p serait tolérable (brouillage hors bande).

Dans le cas le plus défavorable (spectre de brouillage représenté par la courbe A de la Fig. 1), on a constaté que la valeur requise du rapport porteuse/brouillage, pour l'exemple considéré, était de 25,6 dB. Ensuite, si l'on prend comme densité moyenne de la p.i.r.e. la valeur 16,4 dB(W/MHz) pour le système INTELSAT et si l'on considère la relation entre la p.i.r.e. brouilleuse cumulative et la puissance surfacique à la limite de la bande (Fig. 2), on peut en déduire les valeurs maximales admissibles de la densité spectrale brouilleuse à la limite de la bande. Les résultats sont donnés dans la Fig. 3 en fonction de la largeur de bande autour de la porteuse utile.

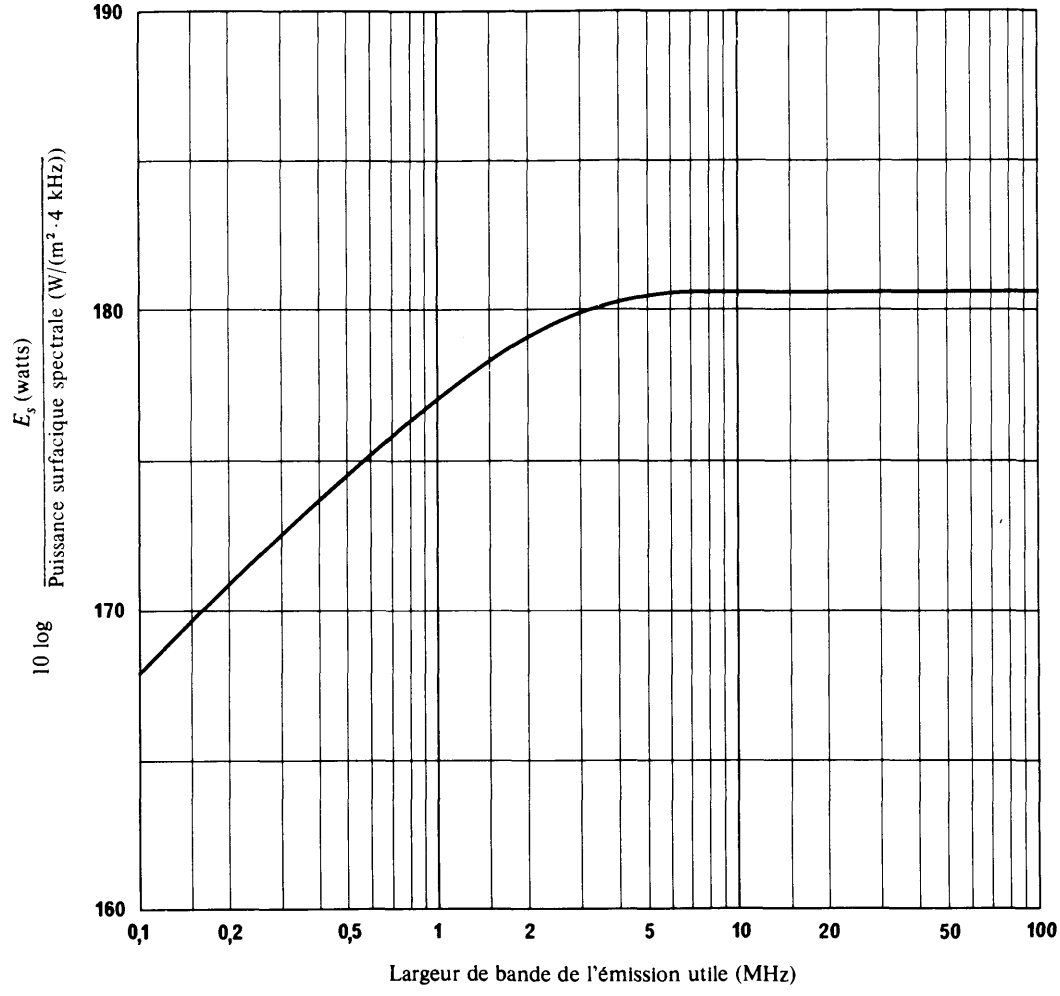


FIGURE 2 – *Rapport de E_s à la puissance surfacique spectrale de brouillage à l'extrémité de la bande attribuée à la radiodiffusion par satellite, en fonction de la largeur de bande de l'émission utile*

E_s : Maximum admissible de la p.i.r.e. de brouillage cumulative dans la largeur de bande de l'émission utile, située à l'extrémité de la bande occupée par le service fixe par satellite, compte tenu d'une bande de garde de 4 MHz

Note. — Cette courbe correspond à la courbe A de la Fig. 1.

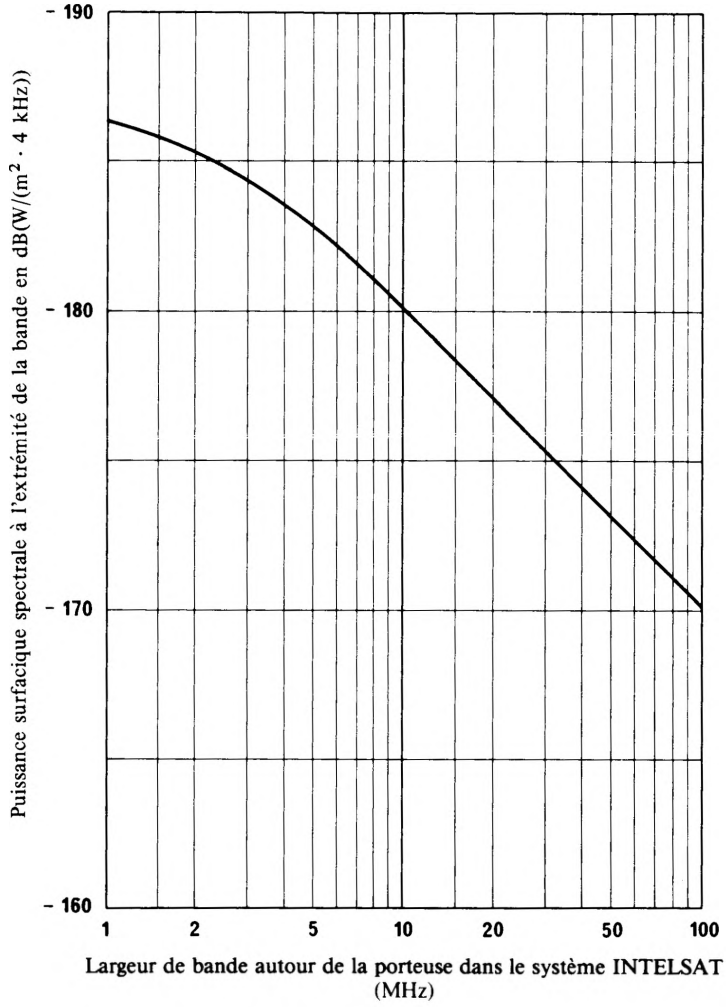


FIGURE 3 — *Puissance surfacique spectrale maximale admissible à l'extrémité de la bande, due à des émissions brouilleuses hors bandes en fonction de la largeur de bande autour de la porteuse dans le système INTELSAT-V*

(Cas d'un seul brouilleur produisant une puissance de bruit de 500 pW0p et dans l'hypothèse d'une bande de garde de 4 MHz à l'intérieur de la bande attribuée au service fixe par satellite)

Note. — Cette courbe correspond à la courbe A de la Fig. 1.

Dans le cas particulier de la porteuse de 20 MHz à 612 voies mentionnée plus haut, on voit que la puissance surfacique maximale admissible à la limite de la bande serait d'environ -177 dB(W/(m^2 · 4 kHz)). On considère qu'une norme de protection fondée sur cette porteuse de 20 MHz serait suffisamment efficace pour la plupart des autres porteuses, à l'exception des porteuses à bande étroite. Ainsi, si l'on évite d'utiliser des porteuses à bande étroite dans la portion supérieure de la bande de 10,7 à 11,7 GHz, une puissance surfacique raisonnable de brouillage hors bande, à la limite du faisceau, serait de -177 dB(W/(m^2 · 4 kHz)). Il convient d'étudier encore les autres systèmes fixes par satellite à large bande dans la bande de 10,7 à 11,7 GHz.

4. Méthodes de protection des stations terriennes du service fixe par satellite

Pour rendre compatibles les émissions non désirées provenant des stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite et le niveau admissible de brouillage dans les stations terriennes du service fixe par satellite, on peut devoir associer les opérations suivantes:

4.1 effectuer une séparation angulaire adéquate entre la position orbitale du satellite dans le service de radiodiffusion par satellite et dans le service fixe par satellite;

4.2 effectuer un filtrage adéquat à la sortie dans l'émetteur des stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite et/ou dans les récepteurs des stations terriennes du service fixe par satellite;

4.3 effectuer une séparation adéquate des fréquences entre le centre du canal le plus bas occupé par une émission provenant d'une liaison spatiale du service de radiodiffusion par satellite et la fréquence protégée, précédemment définie, du service fixe par satellite.

Afin de réduire au minimum les restrictions a priori sur la conception des systèmes dans les deux services, il n'est peut-être pas souhaitable ou pas pratique de se fier uniquement aux conditions de filtrage, comme l'expose le même § 4.2 ci-dessus; cependant, une relation entre, d'une part, les caractéristiques pertinentes des systèmes, y compris l'espacement orbital entre emplacements des satellites et, d'autre part, la séparation des fréquences entre la «fréquence protégée» et la fréquence centrale du canal, telle que l'exposent les § 4.1 et 4.3 ci-dessus, peut être établie.

Cette relation est indiquée dans la Fig. 4, dans laquelle l'espacement nécessaire des satellites est représenté par rapport à la puissance surfacique des émissions non désirées, à la «fréquence protégée» de la station terrienne du service fixe par satellite, avec la séparation des fréquences comme caractéristique. Les courbes ont été tracées à partir de renseignements concernant les émissions hors bande provenant des stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite, donnés par les courbes A et B de la Fig. 1, pour un canal de radiodiffusion par satellite ayant une largeur de bande de 27 MHz.

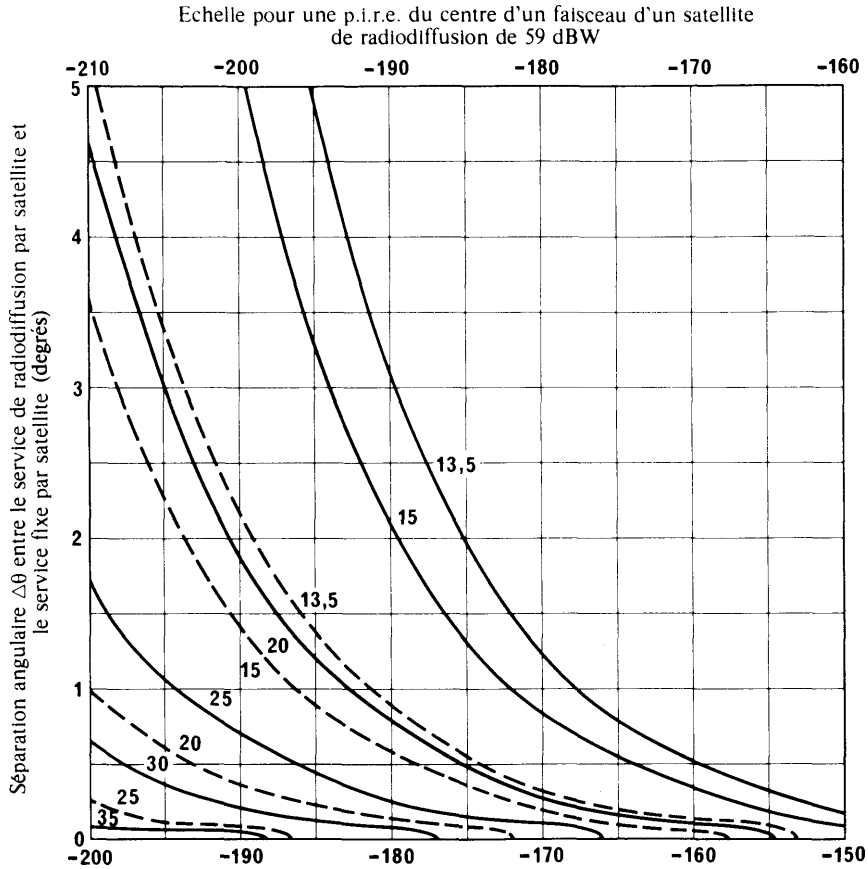


FIGURE 4 — *Espacement angulaire et espacement des fréquences pour protéger les stations terriennes du service fixe par satellite des émissions non désirées provenant des satellites de radiodiffusion dans les bandes adjacentes*

Note 1. — La largeur de bande du signal de radiodiffusion par satellite est égale à 27 MHz.

Note 2. — Les nombres figurant sur les courbes représentent Δf: séparation des fréquences entre la fréquence protégée dans le service fixe par satellite et la fréquence du centre du canal dans le service de radiodiffusion par satellite (MHz).

Note 3. — Courbes en trait plein fondées sur la courbe A de la Fig. 1. Courbes tiretées fondées sur la courbe B de la Fig. 1.

Le niveau absolu des émissions non désirées à la station terrienne du service fixe par satellite dépend, bien entendu, de la p.i.r.e. du satellite de radiodiffusion. Des échelles séparées d'abscisse sont données dans la figure pour des p.i.r.e. de 69 dBW et 59 dBW correspondant à des puissances surfaciques, par temps clair, d'environ -94 dB(W/m^2) et -104 dB(W/m^2) respectivement, au centre de la zone de service du satellite de radiodiffusion.

Le niveau des émissions non désirées dépend également du type de signal de télévision transmis par la station spatiale du service de radiodiffusion par satellite, de l'emplacement de la station terrienne du service fixe par satellite par rapport à la zone de service du satellite de radiodiffusion et du gain et du diagramme des lobes latéraux de l'antenne de réception de la station terrienne. Les courbes en trait plein de la Fig. 4 ont été dessinées pour les cas les plus défavorables, dans lesquels le signal du satellite de radiodiffusion est une émission de barres de couleur modulée à 100% (voir la courbe A de la Fig. 1). Les courbes tiretées correspondent au cas où le signal du satellite de radiodiffusion est un signal d'essai inséré dans la ligne 330 (voir la courbe B de la Fig. 1). Dans les deux cas, on suppose que la station terrienne du service fixe par satellite est située au centre de la zone de service du satellite de radiodiffusion. On suppose que le gain d'antenne de la station terrienne est de 60 dBi et que le diagramme des lobes latéraux est de $32 - 25 \log \varphi$. Si la station terrienne est située hors de la zone de couverture du satellite de radiodiffusion, une protection supplémentaire contre le brouillage est obtenue de la discrimination angulaire de l'antenne d'émission de la station spatiale du satellite de radiodiffusion.

5. Exemples d'espacements des satellites et/ou de séparations de fréquences compatibles (dans une zone commune de couverture)

5.1 *Cas N° 1: A la fois espacement orbital et séparation des fréquences*

A partir des courbes de la Fig. 4, il est possible de calculer les combinaisons de l'espacement orbital $\Delta\theta$ et de la séparation des fréquences Δf qui réduiront les niveaux des émissions non désirées provenant d'un satellite de radiodiffusion au niveau maximal admissible à la fréquence protégée. Les résultats de ces calculs sont présentés dans la Fig. 5, dans laquelle la courbe $\Delta\theta$ en fonction de Δf est dessinée pour des valeurs maximales admissibles de puissance surfacique allant de -210 à -160 dB(W/(m^2 · 4 kHz)). Des séries distinctes de courbes, désignées A et B, sont indiquées pour les deux types de signaux d'essai de satellite de radiodiffusion, correspondant respectivement aux courbes A et B de la Fig. 1.

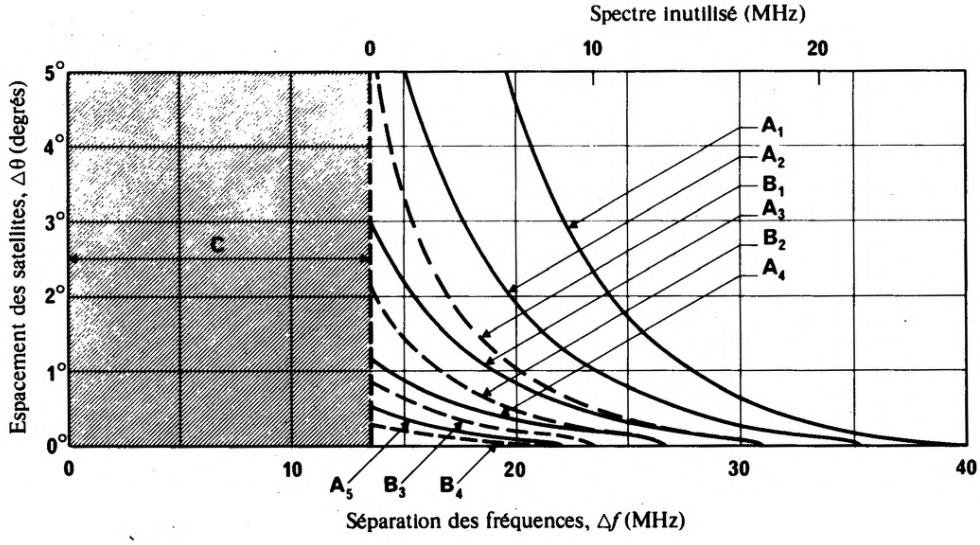


FIGURE 5 — *Compromis entre l'espacement des satellites ($\Delta\theta$) et la séparation des fréquences (Δf) pour diverses valeurs maximales admissibles de puissance surfacique*

A: émission de barres de couleur modulée à 100% (traits pleins)
B: émission d'un signal d'essai inséré dans la ligne 330 (lignes tiretées)

1: 269, soit une puissance surfacique = -200 dB(W/m^2 · 4 kHz)) pour un satellite de 69 dBW
2: 259, soit une puissance surfacique = -200 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) pour un satellite de 59 dBW
3: 249
4: 239
5: 229
C: demi-largeur de bande d'un canal de radiodiffusion par satellite (13,5 MHz)

Note. — La lettre et le chiffre placés à côté des courbes désignent le type de signal de bande de base admis pour l'émission du satellite de radiodiffusion et la différence. E_s – pfd, entre la p.i.r.e. du satellite E_s en (dBW) et le niveau des émissions non désirées, puissance surfacique en dB(W/(m^2 · 4 kHz)) à la station terrienne du service fixe par satellite.

Par exemple, pour maintenir les émissions non désirées provenant d'un satellite de radiodiffusion dont la p.i.r.e. est de 69 dBW, à un niveau maximal de -200 dB(W/(m^2 · 4 kHz)), à une station terrienne du service fixe par satellite, la courbe A_1 indique qu'on peut utiliser les combinaisons suivantes de $\Delta\theta$ et Δf, si on suppose que le signal du satellite de radiodiffusion est une émission de barres de couleur modulée à 100%:

TABLEAU II

$\Delta\theta$ (degrés)	0	1	2	3	4	5
Δf (MHz)	40	28	24,5	22	20,6	18,6
Spectre inutilisé (MHz)	26,5	14,5	11	8,5	7,1	5,1

Ainsi, la séparation nécessaire entre la fréquence protégée et le centre du canal de radiodiffusion du satellite diminue de 40 MHz pour des satellites situés au même endroit ($\Delta\theta = 0$) à 18,6 MHz pour un espacement des satellites de 5°. Il convient de noter qu'il faut environ 13,5 MHz de séparation des fréquences nécessaire (soit la moitié de la largeur de bande supposée pour le canal de radiodiffusion du satellite) pour le spectre essentiel du satellite de radiodiffusion; le reste est le spectre inutilisé, qui se situe entre la fréquence protégée dans la bande du satellite fixe et l'extrémité du canal de télévision dans la bande du satellite de radiodiffusion. Il faut également noter qu'avec un satellite de radiodiffusion ayant une p.i.r.e. de 59 dBW, les mêmes combinaisons de $\Delta\theta$ et Δf maintiendraient les émissions non désirées à la station terrienne à un niveau inférieur à -210 dB(W/(m^2 · 4 kHz)).

Avec la même p.i.r.e. du satellite et la puissance surfacique maximale admissible, des espacements entre satellites et/ou des séparations de fréquences beaucoup plus faibles suffisent, si l'on admet que le signal du satellite de radiodiffusion comporte un signal d'insertion de la ligne 330. En pareil cas, la courbe B_1 de la Fig. 5 montre que l'on peut utiliser les combinaisons suivantes pour $\Delta\theta$ et pour Δf:

TABLEAU III

$\Delta\theta$ (degrés)	0	1	2	3	4	5
Δf (MHz)	30	20	17	15,5	14,5	14
Spectre non utilisé (MHz)	16,5	6,5	3,5	2	1	0,5

Pour une station terrienne du service fixe par satellite recevant une largeur de bande de 20 MHz, autour de la porteuse, la valeur maximale admissible de la puissance surfacique à la fréquence protégée (extrémité de la bande) a été indiquée dans le § 3 comme étant égale à -177 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) environ. Pour obtenir ce niveau d'émissions non désirées à la station terrienne, avec un satellite de radiodiffusion ayant une p.i.r.e. de 69 dBW, on peut utiliser, pour le signal d'essai du cas le plus défavorable, correspondant à la courbe A de la Fig. 1, les combinaisons suivantes de $\Delta\theta$ et Δf, comme l'indique l'interpolation entre les courbes A_3 et A_4 de la Fig. 5:

TABLEAU IV

$\Delta\theta$ (degrés)	0	1	2
Δf (MHz)	30	18	14
Spectre inutilisé (MHz)	16,5	4,5	0,5

Il est à remarquer que, pour des espacements entre les satellites supérieurs à 2°, la séparation des fréquences nécessaire est inférieure à la moitié de la largeur de bande du satellite de radiodiffusion et qu'il n'y a aucun spectre inutilisé. Avec un satellite ayant une p.i.r.e. de 59 dBW, une séparation maximale d'environ 1° suffirait à réduire le spectre inutilisé à zéro.

Si le signal d'insertion de la ligne 330, correspondant à la courbe B de la Fig. 1, est admis comme hypothèse, l'interpolation entre les courbes B_3 et B_4 de la Fig. 5 montre que, pour une valeur donnée quelconque de $\Delta\theta$, la séparation des fréquences nécessaire est réduite de 8 à 10 MHz.

5.2 *Cas N° 2: Satellites voisins* ($\Delta\theta = 0$)

Si l'on admet la possibilité de situer des satellites à proximité les uns des autres, pour éviter d'imposer des restrictions à l'un des deux services dans le positionnement de ses satellites, la réduction des émissions non désirées aux valeurs admissibles doit être obtenue uniquement par une séparation des fréquences. En pareil cas, les valeurs de la puissance surfacique spectrale maximale admissible mentionnées au § 3, ainsi que les courbes données par la Fig. 1 peuvent être utilisées directement pour déduire la séparation des fréquences entre la fréquence centrale du canal inférieur (ou supérieur) de la bande du service de radiodiffusion par satellite et la fréquence protégée du service fixe par satellite. Par souci de commodité, ces courbes sont reproduites à la Fig. 6a); elles permettent de formuler les observations suivantes:

- l'exemple d'un service fixe (de transmission de données) par satellite qui exige un niveau de protection de -171 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) dans la bande de 12,5 à 12,75 GHz conduit à une séparation des fréquences d'environ 20 MHz et 28 MHz, respectivement pour les courbes B et A. Comme indiqué plus haut, cette séparation des fréquences n'intéresse pas la totalité du spectre des fréquences non utilisé, puisque environ 13,5 MHz de cette séparation sont constitués par une partie essentielle du spectre des émissions du service de radiodiffusion par satellite;
- l'exemple d'une transmission par satellite à bande étroite du service fixe qui nécessite un niveau de protection d'environ -200 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) aux limites de la bande de 10,7 à 11,7 GHz conduit à une séparation des fréquences d'environ 30 MHz et 40 MHz, respectivement pour les courbes B et A. Ici encore, on peut considérer qu'une largeur d'environ 13,5 MHz constitue une partie essentielle du spectre des émissions du service de radiodiffusion par satellite;
- l'exemple d'un satellite à large bande du service fixe qui nécessite un niveau de protection de -177 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) aux limites de la bande de 10,7 à 11,7 GHz conduit à une séparation des fréquences d'environ 22 MHz et 30 MHz, respectivement pour les courbes B et A.

5.3 *Cas N° 3: Aucun spectre non utilisé* ($\Delta f = 13{,}5$ MHz)

Dans certains cas, les problèmes de brouillage sur la liaison montante interdisent aux satellites de radiodiffusion à 12 GHz et aux satellites du service fixe d'utiliser des bandes adjacentes. Il y a donc intérêt à étudier un autre cas spécial, dans lequel la réduction des émissions non désirées au niveau admissible est obtenue uniquement par une séparation sur l'orbite.

Les courbes applicables à ce cas, qui correspondent aux deux signaux d'essai précités, sont reproduites dans la Fig. 6b), et peuvent être lues directement. Par exemple, pour protéger une station terrienne du service fixe par satellite recevant une onde porteuse à 20 MHz émise immédiatement en deçà de la limite inférieure de la bande de 10,7 à 11,7 GHz, contre un satellite de radiodiffusion émettant à un niveau de 69 dBW immédiatement au-delà de la limite supérieure de la bande, il faut prévoir un espacement d'environ 2°. Avec un satellite de radiodiffusion émettant à un niveau de 59 dBW, il suffit de prévoir un espacement de 0,8° environ.

Ces deux exemples correspondent au signal d'essai de barres de couleur modulée à 100% dans le cas le plus défavorable correspondant aux émissions non désirées de la courbe A de la Fig. 1. Avec le signal d'essai de la ligne 330, les espacements nécessaires sont réduits de manière significative, comme l'indique la courbe B de la Fig. 6b). En pareil cas, des espacements respectifs d'environ 0,7° et 0,3° peuvent suffire pour des satellites de radiodiffusion ayant une p.i.r.e. de 69 dBW et de 59 dBW.

5.4 *Discussion*

L'une des conséquences des résultats présentés ci-dessus est qu'une série de satellites de radiodiffusion installés sur l'orbite géostationnaire rendraient certains arcs inutilisables par des satellites du service fixe travaillant dans des bandes adjacentes, selon l'écart de fréquence entre le canal le plus proche utilisé par le satellite de radiodiffusion et la fréquence protégée du satellite du service fixe. Ce point est illustré à la Fig. 7, qui montre un ensemble de satellites de radiodiffusion émettant dans la bande de 11,7 à 12,5 GHz, avec un espacement de 7,5°. (La CAMR-RS-77 a attribué dans les Régions 1 et 3 un espacement de 6° entre satellites.) A chacun des points représentés, la totalité des 800 MHz attribués à la Région 1 est rayonnée (des canaux différents étant reçus par des pays différents). Ainsi, les émissions ont lieu dans les canaux inférieurs et dans les canaux supérieurs. La séparation entre les satellites de radiodiffusion est indiquée à titre purement documentaire, mais on peut la considérer comme une séparation typique déterminée par les problèmes de brouillage entre satellites de radiodiffusion, lorsque les satellites de radiodiffusion adjacents utilisent des polarisations opposées. Si tel n'est pas

le cas, l'espacement requis entre les satellites de radiodiffusion est à peu près doublé et les pourcentages de l'orbite utilisables par le service fixe par satellite sont notablement augmentés. Les courbes de la Fig. 7 sont fondées sur la Fig. 5, mais l'axe vertical donne le pourcentage de l'orbite disponible pour le service fixe par satellite dans la bande de 10,7 à 11,7 GHz par rapport à la totalité de l'orbite disponible. Selon les positions relatives des satellites du service fixe et du service de radiodiffusion, ces conditions nouvelles de séparation n'aboutiront pas nécessairement à l'impossibilité de trouver un emplacement pour un autre satellite particulier du service fixe.

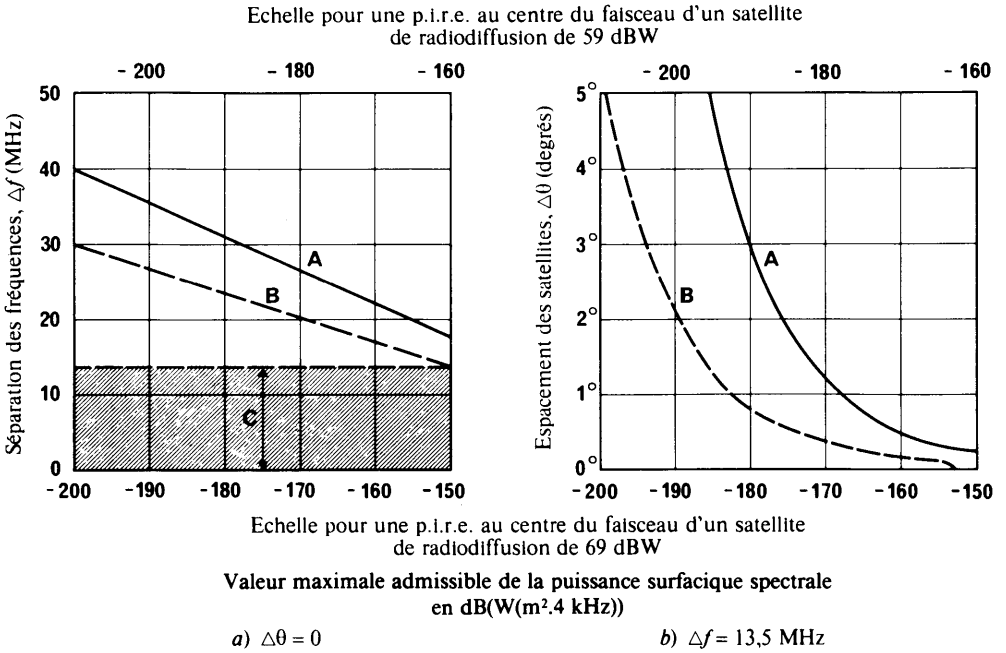


FIGURE 6 — *Séparation des fréquences pour des cas particuliers de satellites voisins (Δθ = 0) et spectre inutilisé égal à zéro (Δf = 13,5 MHz)*

C: demi-largeur de bande d'un canal de radiodiffusion par satellite (13.5 MHz)

Note. — Les lettres portées sur les courbes ont la même signification qu'à la Fig. 5.

Les conséquences de la Fig. 7 devront être évaluées pour ce qui concerne les diverses portions de l'orbite des satellites géostationnaires dans la bande de 10,7 à 11,7 GHz. Par exemple, dans les parties de l'orbite où on prévoit une forte concentration de satellites du service fixe, la séparation orbitale représentée dans les Fig. 5 et 6b) n'est peut-être pas réalisable dans tous les cas. Il pourra être nécessaire de supposer, d'une manière générale, qu'il n'existe aucune séparation orbitale entre les satellites de radiodiffusion dans cette portion de l'orbite.

Concrètement, toute solution à ce problème doit tenir compte du fait qu'il serait généralement inacceptable de modifier la position d'un satellite de radiodiffusion dont les signaux sont destinés à la réception individuelle.

L'hypothèse sur laquelle reposent les études susmentionnées ne prévoyait pas de bandes de garde à la limite des bandes attribuées au service de radiodiffusion par satellite et au service fixe par satellite. La CAMR-RS-77 a prévu des bandes de garde de 14 et 11 MHz, respectivement, aux limites inférieure et supérieure et à l'intérieur des bandes de fréquences attribuées (11,7-12,5 GHz dans la Région 1, 11,7-12,2 GHz dans la Région 3). En conséquence, il se peut que les brouillages causés par les émissions de satellites de radiodiffusion aux systèmes du service fixe par satellite fonctionnant dans les bandes de fréquences adjacentes attribuées à ce service ne soient pas aussi graves que l'indiquent ces études. De plus, celles-ci ne tenaient pas compte de la possibilité d'utiliser des bandes de garde pour les porteuses TT&C. Un complément d'étude est nécessaire pour déterminer si l'utilisation de bandes de garde augmentera le niveau des émissions non désirées provenant des satellites de radiodiffusion, y compris les produits d'intermodulation entre les porteuses TT&C et les porteuses de télévision.

6. Observations techniques sur l'attribution des bandes de fréquences

Cette étude des émissions non désirées montre que des problèmes techniques particulièrement ardus se posent lorsqu'une attribution de fréquence au service de radiodiffusion par satellite (avec possibilité de réception individuelle) et une allocation au service fixe par satellite (avec systèmes à faisceaux mondiaux, antennes de grand diamètre pour les stations terriennes, amplificateurs à faible bruit de forte sensibilité et technique de modulation à bande étroite) sont adjacentes dans le Tableau d'attribution des bandes de fréquences du Règlement des radiocommunications.

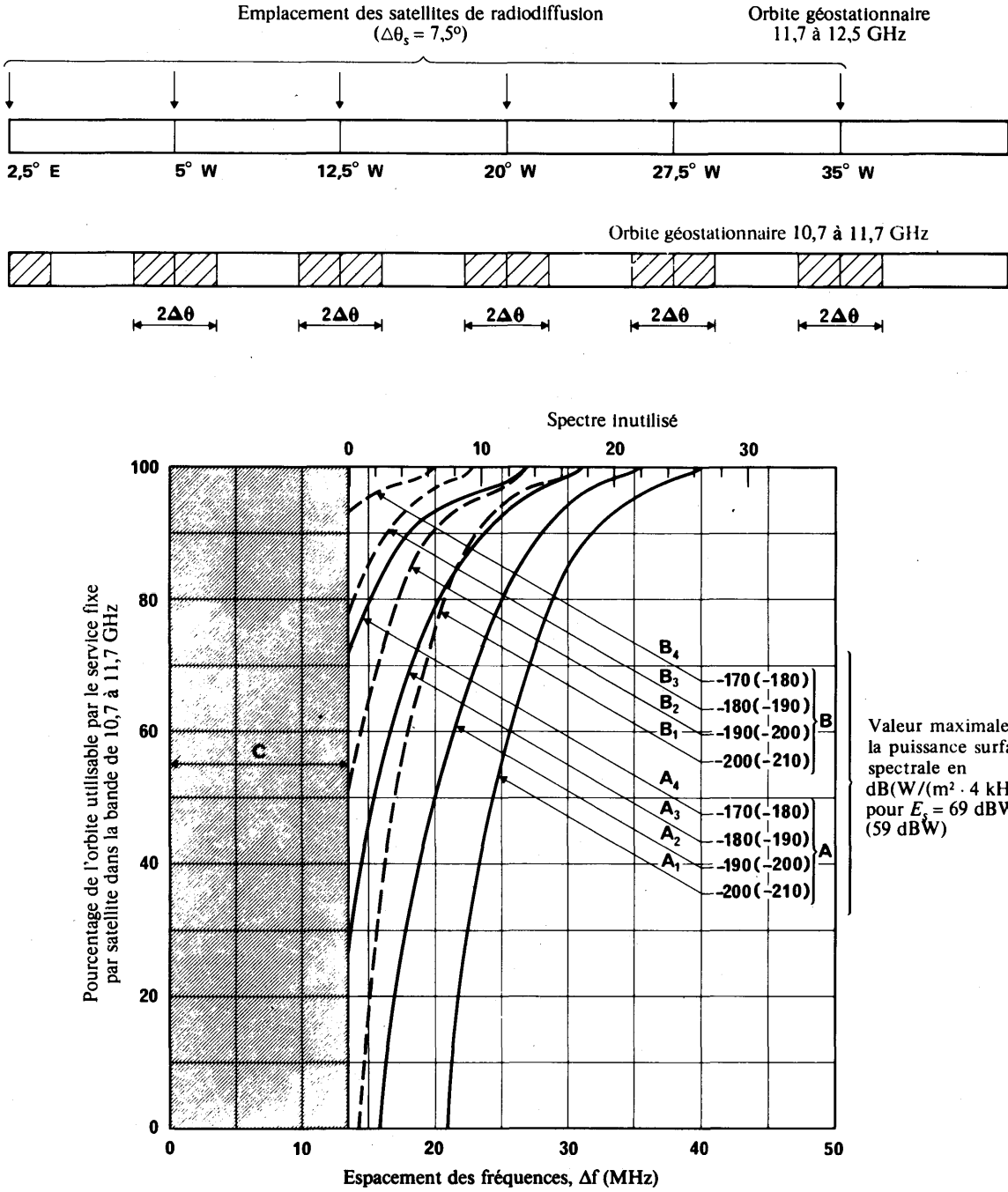


FIGURE 7 — *Exemple de l'effet possible des* émissions non désirées en provenance *de satellites de radiodiffusion à 12 GHz sur l'arc orbital utilisable par les satellites du service fixe émettant dans des bandes adjacentes*

C: mi-largeur de la voie du satellite de radiodiffusion

Orbite utilisable par les satellites du service fixe

Orbite non utilisable par les satellites du service fixe

Note. — La désignation des courbes correspond à celle des courbes de la Fig. 5.

Les stations terriennes du service fixe par satellite situées dans la zone de service d'un service de radiodiffusion par satellite sont soumises à des émissions de grande puissance de la part des stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite. Ces émissions, qui se produisent dans la bande adjacente au service fixe par satellite, peuvent provoquer, lorsqu'elles sont reçues sans affaiblissement, une surcharge de récepteur à faible bruit de la station terrienne du service fixe par satellite et, partant, une augmentation de la température effective de bruit du système. Par conséquent, il convient de tenir compte de cette éventualité dès la phase de conception des stations terriennes du service fixe par satellite.

RAPPORT 873

ANALYSE DU BROUILLAGE CAUSÉ PAR LE SERVICE DE RADIODIFFUSION PAR SATELLITE D'UNE RÉGION AU SERVICE FIXE PAR SATELLITE D'UNE AUTRE RÉGION AUX ENVIRONS DES 12 GHz

(Programme d'études 2T/4)

(1982)

1. Introduction

La CAMR-79 a attribué des bandes de fréquences communes au service fixe par satellite et au service de radiodiffusion par satellite, dans les différentes Régions, à utiliser en partage selon les modalités suivantes: la bande 11,7-12,2 GHz est attribuée au service fixe par satellite dans la Région 2 et au service de radiodiffusion par satellite dans les Régions 1 et 3, tandis que la bande 12,5-12,7 GHz est attribuée au service fixe par satellite dans la Région 1 et au service de radiodiffusion par satellite dans la Région 2. Le fonctionnement du service de radiodiffusion par satellite dans les Régions 1 et 3, et dans les bandes 11,7-12,5 et 11,7-12,2 GHz, respectivement, a été organisé dans le cadre du plan établi par la CAMR-RS-77. La CAMR-RS-77 a fixé des valeurs de puissance surfacique entre régions sous la forme de seuils de coordination, mais n'a pas fixé de valeurs comparables dans la bande de 12,5-12,7 GHz; dans cette bande, la planification du service de radiodiffusion par satellite dans la Région 2, sera effectuée par la prochaine CARR SAT-R2 en 1983.

Les documents présentés ici traitent de certains problèmes liés au partage interrégional des fréquences entre différents services spatiaux; ils pourraient servir de base à de nouvelles études et faciliter les travaux de la CARR SAT-R2-83. On trouvera des informations supplémentaires à ce sujet dans le Rapport 809 et les dispositions réglementaires pertinentes dans la Résolution N° 700 (CAMR-79).

2. Hypothèses relatives aux systèmes

2.1 *Service fixe par satellite*

Pour le service fixe par satellite, on a retenu trois systèmes présentant les caractéristiques indiquées au Tableau I.

2.2 *Service de radiodiffusion par satellite*

Pour le service de radiodiffusion par satellite, une valeur de 63 dBW par porteuse et une dispersion d'énergie triangulaire «à la vitesse de trame» crête-à-crête de 600 kHz (dans l'hypothèse du § 2.1 au sujet de la largeur de bande de référence, on obtient $\delta = 0{,}067$) ont été considérées aux fins de la présente étude comme représentatives des émissions au centre du faisceau.

On peut admettre également que, dans la plupart des cas, le gain d'antenne du satellite de radiodiffusion en direction de l'«autre» Région peut être maintenu au «premier niveau dans le lobe latéral» de -30 dB indiqué par le diagramme de référence de l'antenne en question, ou au-dessous de ce niveau.

Dans ces conditions, la puissance rayonnée (p.i.r.e.) par le satellite de radiodiffusion en direction de l'«autre» Région sera d'environ 33 dBW, et la densité spectrale de puissance rayonnée (densité spectrale de p.i.r.e.) d'environ 21 dB(W/40 kHz).

Le Tableau II indique les paramètres pertinents relatifs aux caractéristiques du service de radiodiffusion par satellite.

TABLEAU I

Caractéristiques pertinentes	Système A	Système B	Système C
Diamètre de l'antenne, D/λ	60	60	$\geqslant 100$
Gain dans les lobes latéraux de l'antenne (dB)	$34 - 25 \log \theta$	$34 - 25 \log \theta$	$32 - 25 \log \theta$
Mode de transmission	numérique à une seule voie par porteuse	numérique à une seule voie par porteuse	données à large bande
Largeur de bande de référence	40 kHz	40 kHz	2 MHz
Température de bruit du système de réception par ciel clair (K)	200	400	100
Rapport porteuse/bruit par ciel clair (dB)	12	16	-
Rapport porteuse/brouillage (3) (dB)	20,5 (1)	20,5 (1)	-
Rapport brouillage/bruit (3) (dB)	-	-	13,5 (2)
Niveau de brouillage admissible (3) (dBW)	- 168,1	- 161,1	- 159,0

(1) Sur la base d'un critère de brouillage $C/I = 27,5 + 6 \log \delta$ pour la dispersion «à la vitesse de trame» d'une porteuse vidéo brouilleuse.

(2) En supposant la présence d'un bruit thermique exclusivement interne et d'un accroissement progressif du brouillage de source unique avant démodulation de 4%.

(3) Entre deux systèmes du service fixe par satellite.

TABLEAU II — *Niveaux de brouillage provenant du service de radiodiffusion par satellite*

Système brouillé du service fixe par satellite	Système A	Système B	Système C
p.i.r.e. du système brouilleur (dBW)	63 − 30	63 − 30	63 − 30
Brouillage causé aux systèmes du service fixe par satellite (dBW)	$-138,5 - 25 \log \theta$	$-138,5 - 25 \log \theta$	$-140,5 - 25 \log \theta$

3. Evaluation du potentiel de brouillage

Le niveau de brouillage dans les systèmes du service fixe par satellite est fonction de l'espacement angulaire topocentrique entre le satellite du service fixe et le satellite du service de radiodiffusion par satellite. Pour déterminer si les émissions du service de radiodiffusion par satellite sont compatibles avec les systèmes considérés du service fixe par satellite, il est commode d'établir une relation d'équivalence entre les niveaux de brouillage admissibles (Tableau I) et le brouillage causé par un satellite de radiodiffusion (Tableau II), ce qui donnerait les formules suivantes pour l'espacement requis entre les satellites pour les trois systèmes retenus pour le service fixe par satellite:

- Pour les systèmes du service fixe par satellite du type A,

$$-138,5 - 25 \log \theta = -168,1 - M$$
ou
$$25 \log \theta = 29,6 + M$$

- Pour les systèmes du service fixe par satellite du type B,

$$-138,5 - 25 \log \theta = -161,1 - M$$
ou
$$25 \log \theta = 22,6 + M$$

- Pour les systèmes du service fixe par satellite du type C,

$$-140,5 - 25 \log \theta = -159,0 - M$$
ou
$$25 \log \theta = 18,5 + M$$

Dans ces formules, M représente la marge inter-services au-dessous du niveau de brouillage de source unique admissible entre les réseaux du service fixe par satellite. La Fig. 1 donne les valeurs d'espacement angulaire θ pour les systèmes A, B et C pour des marges inter-services M comprises entre $+3$ dB et $+10$ dB. Un complément d'étude est nécessaire pour déterminer la valeur qui convient le mieux pour la marge inter-services M.

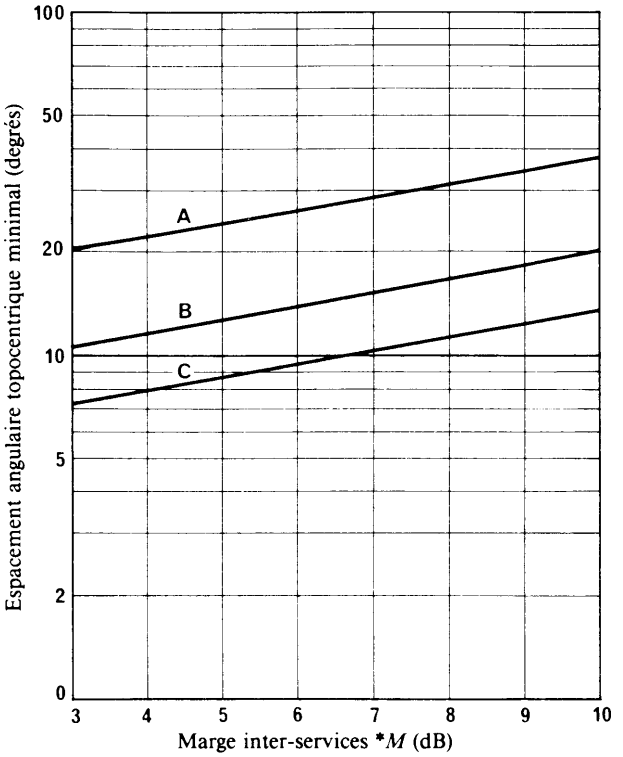


FIGURE 1 — *Valeurs minimales de l'espacement angulaire topocentrique entre les systèmes du SRS et ceux du SFS en fonction d'une marge inter-services de brouillage admissible inférieure au niveau de brouillage de source unique dans le service fixe par satellite*

A: Système A
B: Système B
C: Système C

* Les valeurs utilisées ici ont été choisies seulement pour illustrer les relations établies. Un complément d'étude est nécessaire pour déterminer la marge inter-services M à utiliser pour évaluer les valeurs d'espacement angulaire requises.

4. Conclusions

Les attributions actuelles de bandes de fréquences donnent lieu à des interactions entre les émissions du service de radiodiffusion par satellite d'une Région et celles du service fixe par satellite d'une autre Région.

Il ressort de l'analyse ci-dessus que le partage interrégional entre les deux services étudiés peut gêner le fonctionnement du service fixe par satellite lorsque leurs stations spatiales respectives ont un espacement angulaire topocentrique inférieur aux valeurs indiquées sur la Fig. 1.

L'ampleur de ces problèmes dépend des caractéristiques de conception des systèmes du service fixe par satellite et du service de radiodiffusion par satellite. En particulier, les valeurs de la p.i.r.e. et du gain en dehors de l'axe des antennes de satellite de radiodiffusion, choisies par hypothèse, correspondent à une certaine puissance surfacique dans la Région où fonctionnent les systèmes du service fixe par satellite. On peut donc se demander si l'adoption d'une valeur limite de la puissance surfacique dans une Région, lorsque le service de radiodiffusion par satellite dessert une autre Région, permettrait d'éviter d'autres difficultés. Cette solution ne pourra pas éliminer complètement les difficultés, car les limites nécessaires pour protéger le service fixe par satellite lorsque l'espacement angulaire entre les satellites ou les zones de service, ou les deux, est très petit ou nul, seraient très difficiles à imposer dans la pratique. Cependant, l'adoption de valeurs limites de puissance surfacique pourrait permettre de réduire l'espacement angulaire entre satellites à l'intérieur duquel d'autres difficultés subsisteraient et devraient être résolues à l'aide d'autres moyens. Parmi ces autres solutions, citons les techniques de réduction du brouillage telles que la mise en forme de faisceaux d'antenne d'émission du satellite de radiodiffusion, la discrimination de polarisation, la planification de fréquences, surtout en ce qui concerne les transmissions SCPC sensibles dans le service fixe par satellite, et l'ajustement des tolérances de brouillage. Cette question doit faire l'objet d'un complément d'étude.

RAPPORT 713-1

RAYONNEMENTS NON ESSENTIELS PROVENANT DES STATIONS TERRIENNES ET SPATIALES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Question 25/4)

(1978-1982)

1. Introduction

Les rayonnements non essentiels provenant des stations spatiales du service fixe par satellite peuvent causer des brouillages aux stations de réception d'autres services et en particulier aux stations destinées à recevoir des signaux très faibles. Ce brouillage peut être particulièrement désagréable aux fréquences des bandes attribuées au service de radioastronomie. Jusqu'à présent, le Règlement des radiocommunications ne fixe pas de limites au rayonnement non essentiel pour les émetteurs fonctionnant à des fréquences supérieures à 17,7 GHz. Il n'en fixe pas non plus pour les transmissions numériques ni pour les services spatiaux au-dessus de 960 MHz.

Les rayonnements non essentiels provenant des stations terriennes du service fixe par satellite peuvent également causer des brouillages. Ces cas de brouillage causés par des rayonnements non essentiels peuvent être traités selon les circonstances. Cependant, le nombre de stations terriennes du service fixe par satellite s'accroît rapidement et leur séparation géographique, que l'on a réalisée dans le passé, peut ne pas être réalisable dans l'avenir. Il semble donc souhaitable d'étudier le problème des rayonnements non essentiels provenant des stations terriennes et spatiales du service fixe par satellite. Par sa Recommandation N° 66, la CAMR-79 a demandé que ces études soient entreprises d'urgence.

2. Nature et niveau de puissance possible des rayonnements non essentiels provenant des stations terriennes et spatiales

On possède peu de renseignements sur les niveaux de puissance des rayonnements non essentiels provenant de stations terriennes et spatiales et, faute de renseignements, il est difficile d'étudier le problème de manière réaliste. Afin de donner une base de discussion, on trouvera dans le présent paragraphe une prévision très approximative de l'ordre de grandeur de la puissance de ces rayonnements et leur fréquence approximative. Dans ce qui suit, PD_{WE} et F_{WE} représentent la densité de puissance et la fréquence de l'émission utile à l'entrée de l'antenne de la station terrienne, tandis que PD_{WS} et F_{WS} représentent la densité de la p.i.r.e. et la fréquence de l'émission utile du satellite.

On peut distinguer les types classiques suivants de rayonnements non essentiels:

- les fréquences harmoniques et conjuguées de l'émission utile;
- les fréquences fondamentales et harmoniques des oscillateurs utilisés dans le processus de conversion des fréquences;

- les oscillations parasites;
- les produits d'intermodulation causés par l'amplification non linéaire et peut-être les non-linéarités dues aux inhomogénéités dans la chaîne guide d'onde-filtre-alimentation d'antenne, qui suit l'amplificateur final.

Il peut y avoir, cependant, d'autres sources importantes de rayonnements non essentiels.

Les harmoniques de l'émission utile auront une distribution de puissance spectrale semblable à celle de l'émission utile. Leurs fréquences seront des multiples de F_W, et leur densité de puissance maximale pourra être de $(PD_{WE} - 80)$ dB(W/MHz) ou $(PD_{WS} - 50)$ dB(W/MHz).

La fréquence la plus basse attribuée au service fixe par satellite, pour les émissions provenant de l'espace, étant de 2,5 GHz, les harmoniques auront une fréquence au moins égale à 5 GHz. Ces émissions sont susceptibles de s'étendre sur une largeur de bande de plusieurs MHz et leurs niveaux de densité de puissance peuvent atteindre -70 à -60 dB(W/MHz) pour les stations terriennes ou une densité de la p.i.r.e. de -10 à -30 dB(W/MHz), dans le cas d'émissions provenant des satellites.

Les signaux conjugués seront à peu près semblables, mais leur puissance aura probablement été réduite par les filtres passe-bande de l'émetteur à un niveau de l'ordre de -90 dB(W/MHz) pour les stations terriennes et d'environ -60 dB(W/MHz) pour les stations spatiales.

On peut s'attendre que la fondamentale et les harmoniques des oscillateurs locaux des stations terriennes aient un niveau de l'ordre de -50 dBW, tandis que, dans le cas d'émissions provenant des satellites, on peut s'attendre que la p.i.r.e. maximale soit de l'ordre de -60 dBW. Cependant, le niveau de puissance réel rayonné, dans tous les cas, dépendra beaucoup des détails de conception. De plus, ces rayonnements non essentiels, puisqu'ils ne sont pas modulés, peuvent causer un brouillage important dans les systèmes sensibles à bande étroite, même si la valeur absolue du rayonnement brouilleur est très basse. Les effets des oscillations parasites peuvent être semblables en nature mais plus imprévisibles en fréquence et plus graves en degré.

Les produits d'intermodulation des stations terriennes auront des distributions spectrales semblables à celles des émissions utiles, d'habitude largement étendues, et elles tendent à être concentrées près de F_W. Aux extrémités de la bande de fréquences occupée, le niveau des produits d'intermodulation peut être de l'ordre de $(PD_{WE} - 30)$ dB(W/MHz), ce qui donne une valeur absolue d'environ -20 à -10 dB(W/MHz).

Les produits d'intermodulation provenant du satellite auront également des distributions spectrales semblables à celles des émissions utiles. Aux extrémités de la bande de fréquences occupée par les répéteurs du satellite, le niveau des produits d'intermodulation peut être de l'ordre de $(PD_{WS} - 20)$ dB(W/MHz), ce qui donne une valeur absolue d'environ 0 à -20 dB(W/MHz).

Ces niveaux devraient diminuer considérablement à des fréquences plusieurs fois égales à la largeur de la bande occupée à partir de l'extrémité de la bande.

Les composantes du spectre des signaux, dues à la modulation, mais étant situées juste à l'extérieur de la largeur de bande nécessaire, sont des émissions hors bande et ne peuvent, par définition, être qualifiées de «rayonnements non essentiels», mais elles aussi peuvent être source de brouillage, surtout lorsque la fréquence porteuse est proche de l'extrémité de la bande de fréquences attribuée.

Pour les stations terriennes, les évaluations ci-dessus sont celles de la puissance des rayonnements non essentiels à l'entrée de l'antenne d'une station terrienne d'émission. La p.i.r.e. de l'antenne dépendra alors du diagramme de rayonnement à la fréquence en question. En première approximation, on suppose ici que le gain d'antenne de la station terrienne, dans une direction donnée, est le même pour des rayonnements non essentiels que pour l'émission utile. Dans la plupart de ces cas de brouillage, on peut supposer que le signal d'un rayonnement non essentiel est rayonné dans une direction très éloignée du lobe principal de l'antenne de la station terrienne. On a pris comme hypothèse un gain de 0 dB, dans le présent Rapport.

3. Niveaux de brouillage admissibles à une station de réception

Avant que des limites aient pu être déterminées pour la puissance des rayonnements non essentiels des stations terriennes, il convient d'établir une relation entre la puissance de ces rayonnements et le niveau de brouillage qu'ils peuvent causer à des stations de réception classiques des divers services susceptibles d'être affectés. Ces niveaux de brouillage, ainsi que le pourcentage de temps pendant lequel il se produit, doivent à leur tour être reliés avec les niveaux de brouillage admissibles provenant de toutes les sources. La détermination de ces niveaux de brouillage total et du pourcentage de rayonnements non essentiels possible doit, bien entendu, être faite par des Commissions d'études responsables des services concernés. Cette tâche est importante car les limites actuelles des rayonnements non essentiels, telles qu'elles sont fixées à l'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications, ne vont pas au-delà de 17,7 GHz et ne concernent pas les transmissions numériques ni les services spatiaux au-dessus de 960 MHz. Ces études devront tenir compte des facteurs suivants:

- le nombre probable de cas de brouillage simultané dus aux rayonnements non essentiels provenant de stations de tous les services;
- l'effet du spectre du signal brouilleur sur le service affecté, comparé à la quantité équivalente de bruit thermique;

- la largeur de bande qui convient le mieux pour calculer les niveaux de brouillage;
- la sensibilité au brouillage des services à l'intérieur de la bande;
- dans les bandes partagées, la quantité de brouillage qui résulte du partage de la bande.

Afin de mieux comprendre le problème, le présent Rapport se place dans la situation représentative d'un service qui reçoit des rayonnements non essentiels provenant uniquement de stations du service fixe par satellite. Les niveaux de brouillage admissibles ont été calculés à partir des Rapports et des Avis existants des Commissions d'études pertinentes du CCIR. On a pris comme hypothèse générale une composante non essentielle de 10 à 20 dB au-dessous du niveau du brouillage admissible dans la bande. Cette gamme de valeurs du brouillage causé par des rayonnements non essentiels est donnée à titre d'exemple seulement et doit être revue, à mesure que les travaux se poursuivront pour répondre à la Question 25/4. Cependant, par souci de simplicité, seule la valeur de 20 dB a été utilisée dans les exemples qui suivent.

3.1 *Brouillage causé aux stations de faisceaux hertziens par des stations terriennes*

Les études entreprises antérieurement par les Commissions d'études 4 et 9 du CCIR à propos de la détermination des possibilités de brouillage entre stations terriennes et stations de Terre ont permis d'établir les valeurs des puissances de brouillage admissibles. Le Rapport 448 fournit les valeurs des niveaux admissibles à long terme pour les faisceaux hertziens fonctionnant à des fréquences comprises entre 1 et 40 GHz. Les valeurs caractéristiques du niveau admissible à long terme pour chaque source de brouillage sont -151 dB(W/4 kHz) pour les systèmes à modulation analogique fonctionnant à 6 GHz et -134 dB(W/MHz) pour les systèmes à modulation numérique fonctionnant à 30 GHz, ces valeurs étant applicables lorsque le brouillage est présent de manière continue.

Une limite correspondant à 20 dB au-dessous de ces valeurs peut être nécessaire pour définir une attribution raisonnable de cette tolérance de brouillage aux rayonnements non essentiels provenant des stations terriennes du service fixe par satellite, ce qui donnerait des valeurs voisines de -171 dB(W/4 kHz) à 6 GHz et de -154 dB(W/MHz) à 30 GHz.

D'après ces hypothèses et en admettant également que la source de brouillage se trouve dans la direction de la sensibilité maximale de l'antenne de la station de faisceaux hertziens, le rayonnement non essentiel dont la densité de p.i.r.e. ne dépasse pas -80 dB(W/4 kHz) à 6 GHz ou -54 dB(W/MHz) à 30 GHz ne devrait pas causer un brouillage supérieur au niveau admissible dans un récepteur de station de faisceaux hertziens situé à 25 km, en admettant que la propagation se fasse en espace libre.

3.2 *Brouillage causé aux stations de faisceaux hertziens par les stations spatiales*

Les études effectuées par les Commissions d'études 4 et 9 ont permis d'établir un niveau maximal de la puissance surfacique enregistré sur les porteuses émises par les satellites du service fixe par satellite fonctionnant dans toutes les bandes de fréquences utilisées en partage avec le service fixe de Terre. Les valeurs admissibles de la puissance surfacique sont indiquées dans l'Avis 358. Pour des angles d'arrivée supérieurs à 25°, ces valeurs de la puissance surfacique sont comprises entre -144 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) aux environs de 2 GHz et -138 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) aux environs de 12 GHz; la valeur correspondante de la puissance surfacique à 20 GHz est de -105 dB(W/(m^2 · MHz)). Il pourrait être nécessaire de fixer une limite de la densité de p.i.r.e. correspondant à 20 dB au-dessous de ces limites de puissance surfacique pour définir une attribution raisonnable de cette tolérance du bruit causé par le brouillage aux rayonnements non essentiels provenant d'un satellite géostationnaire du service fixe par satellite; on obtiendrait des valeurs de -2 dB(W/4 kHz) à 2 GHz et de 37 dB(W/MHz) aux environs de 20 GHz. Cela suppose que le diagramme de rayonnement de l'antenne de la station spatiale aux fréquences du rayonnement non essentiel est analogue à celui de la fréquence fondamentale.

3.3 *Brouillage causé aux stations «transhorizon» par les stations terriennes*

Comme pour les faisceaux hertziens en visibilité directe, le Rapport 448 indique les valeurs des brouillages admissibles pour les systèmes transhorizon. En admettant que le niveau de la composante non essentielle est de 20 dB au-dessous du niveau du brouillage admissible, la limite du brouillage provenant des rayonnements non essentiels est de l'ordre de -160 dB(W/4 kHz) pendant 0,01% du temps. D'après cette hypothèse, la limite de la densité de la p.i.r.e. d'un rayonnement non essentiel provenant d'une station terrienne, requise pour éviter le dépassement des valeurs admissibles du brouillage causé à un récepteur de station transhorizon situé à une distance de 100 km, le trajet entre stations étant terrestre, serait de -74 dB(W/4 kHz). La valeur correspondante pour un intervalle de 250 km est de -48 dB(W/4 kHz). Ce calcul, ainsi que les autres exemples de brouillage sur un trajet terrestre à grande distance indiqués dans le présent Rapport, sont fondés sur les données relatives à la propagation au-dessus de la Terre sans effet d'écran de l'emplacement (voir le Rapport 569).

3.4 *Brouillage causé aux stations transhorizon par les stations spatiales*

Le numéro 2560 du Règlement des radiocommunications stipule que la puissance de brouillage provenant d'une station spatiale à l'entrée du récepteur d'une station transhorizon ne doit pas dépasser -168 dB(W/4 kHz). Un tel niveau de signal brouilleur peut être obtenu si un signal en provenance d'un émetteur de satellite du service fixe par satellite, ayant une puissance surfacique de -189 dB(W/(m^2 · 4 kHz)), entre directement dans le lobe

principal de l'antenne du système transhorizon. Une limite de la puissance surfacique de 20 dB au-dessous de cette valeur semble constituer une tolérance raisonnable pour l'ensemble des rayonnements non essentiels du satellite. Il pourrait être nécessaire de prévoir une petite réduction supplémentaire pour atteindre une valeur admissible des rayonnements non essentiels provenant d'un satellite quelconque, de manière à tenir compte des sources multiples de brouillage, ce qui se traduirait par une limite de densité de la p.i.r.e. d'environ -50 dB(W/4 kHz).

3.5 *Brouillage causé à des stations terriennes du service fixe par satellite par des stations terriennes*

Le Rapport 448 contient un nombre de renseignements suffisant pour calculer les puissances d'entrée admissibles des brouillages provenant de toutes les sources, à l'exception des valeurs relatives à la température de bruit de la station terrienne. En se fondant sur des hypothèses raisonnables pour la température de bruit, on obtient, pour les fréquences comprises entre 1 et 10 GHz, une valeur de la puissance de brouillage admissible d'environ -146 dB(W/MHz), pouvant atteindre -140 dB(W/MHz) pour des systèmes fonctionnant dans la gamme de 15 à 40 GHz; ces valeurs s'appliquent par exemple à 0,01% du temps. Une limite de 20 dB au-dessous de ces valeurs semble être une tolérance raisonnable pour tenir compte des rayonnements non essentiels. D'après ces hypothèses, les rayonnements non essentiels ayant une densité de p.i.r.e. ne dépassant pas les valeurs suivantes ne devraient pas causer un brouillage supérieur au niveau admissible à une autre station terrienne située à une distance de 100 km, le trajet entre stations étant terrestre:

pour les fréquences voisines de 4 GHz: -35 dB(W/MHz),
pour les fréquences voisines de 12 GHz: -29 dB(W/MHz),
pour les fréquences voisines de 30 GHz: -6 dB(W/MHz).

3.6 *Brouillage causé aux stations terriennes du service fixe par satellite par des stations spatiales d'un service quelconque*

Les stations terriennes du service fixe par satellite sont susceptibles de recevoir des rayonnements non essentiels:

a) directement de satellites brouilleurs;
b) indirectement de satellites brouilleurs, après retransmission par le satellite utile;
c) indirectement de stations terriennes d'autres réseaux ou de stations de Terre, après retransmission par le satellite utile;
d) du satellite utile, les rayonnements non essentiels étant originaires soit du satellite utile, soit d'autres stations terriennes du même réseau.

On peut admettre que *c)* sera faible et que *d)* peut être négligé. Un examen indique de plus que la probabilité d'un brouillage appréciable causé à une station terrienne par la voie *b)* sera très faible et que l'on peut en conséquence accepter pour *b)* les limites de brouillage obtenues pour *a)* (voir l'Annexe I).

Dans des cas exceptionnels, il se peut qu'il soit nécessaire de coordonner l'emplacement des satellites afin de maîtriser le brouillage causé par le niveau élevé des rayonnements non essentiels que l'on peut prévoir. Tel est le cas du brouillage à une limite de bande causé par des satellites de radiodiffusion. Mais, dans le cas général, il est désirable que le niveau de brouillage soit si bas que celui-ci puisse être toléré sans coordination. Nous suggérons donc qu'une marge arbitraire de 5% du bilan total de brouillage entre réseaux soit allouée pour faire face aux cas normaux *a)* et *b)* ci-dessus, c'est-à-dire 50 pWp pour les émissions à modulation de fréquence à multiplexage par répartition en fréquence MRF-MF; aucune recommandation n'a encore été formulée quant au brouillage admissible pour les émissions numériques. De plus, il est improbable que les rayonnements non essentiels pénètrent dans une seule et même voie utile par les deux trajets *a)* et *b)* à la fois, de sorte que la fraction de 5% peut être allouée à chacun d'eux.

Puisque le brouillage causé par des rayonnements non essentiels peut provenir d'un satellite qui n'utilise pas les mêmes bandes de fréquences que le satellite utile, le processus normal de coordination ne peut pas être supposé prévenir la pénétration, dans le faisceau principal de la station terrienne, du brouillage causé par un rayonnement non essentiel. Mais si le niveau à la surface de la Terre de la puissance surfacique des rayonnements non essentiels est tellement bas que leur entrée puisse être tolérée dans le faisceau principal d'une station terrienne dotée d'une antenne à gain élevé, on peut admettre que tout autre rayonnement non essentiel dont le niveau est faible et du même ordre de grandeur aura un effet négligeable s'il pénètre par les lobes latéraux. De même, il est improbable qu'une antenne de station terrienne à gain élevé subirait l'entrée directe de rayonnements non essentiels provenant de plusieurs satellites à la fois. Les stations terriennes à faible gain peuvent subir directement plusieurs entrées de brouillage, mais cela n'aura pas d'importance si le niveau acceptable est déterminé par la protection des antennes à gain élevé.

3.6.1 *Entrée directe de brouillages provenant du satellite brouilleur (cas a))*

A titre de première étape vers le calcul de niveaux acceptables des rayonnements non essentiels, il serait commode de suivre le schéma tracé dans l'Avis 358 et de diviser le spectre des fréquences à la fréquence 15,4 GHz. Au-dessous de 15,4 GHz, on pourrait prendre pour caractéristiques celles des stations terriennes existantes qui reçoivent des signaux MRF-MF dans la bande des 4 GHz, le niveau maximal admissible de la densité spectrale surfacique de la puissance de brouillage étant calculé dans une bande des 4 kHz. Au-dessus de 15,4 GHz, il serait nécessaire de formuler des hypothèses quant aux caractéristiques des futures stations terriennes ayant à recevoir dans la bande des 19 GHz, la limite de la densité spectrale surfacique de puissance étant calculée dans une bande de 1 MHz.

Dans une entrée directe de brouillage dans une antenne de station terrienne à gain élevé, par exemple l'une des antennes INTELSAT normalisées A et C ayant à recevoir des signaux MRF-MF, il convient que la densité spectrale surfacique de la puissance de brouillage ne dépasse pas -221 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) au-dessous de 15,4 GHz. Au-dessus de 15,4 GHz, la limite pourrait être -182 dB(W/(m^2 · MHz)). La justification de ces chiffres figure à l'Annexe I.

3.6.2 *Entrée indirecte de brouillage provenant d'un satellite brouilleur par l'intermédiaire du satellite utile (cas b))*

On peut admettre que le gain d'une antenne de satellite sous des angles très éloignés du faisceau principal est égal à 0 dB par rapport à l'antenne isotrope. Cette hypothèse est probablement applicable au brouillage reçu par un satellite en provenance d'un autre satellite, pourvu que l'excentricité de l'orbite soit maintenue à une faible valeur.

Avec cette hypothèse, un rayonnement non essentiel conforme aux limites indiquées au § 3.1 pourrait introduire dans une voie utile un brouillage de 50 pWp s'il entrait dans la station terrienne indirectement par l'intermédiaire du satellite utile, et si l'espacement entre les deux satellites était d'environ 4 km (voir l'Annexe I). Cela correspond à un angle de séparation de 0,006°, qui est extrêmement petit. La probabilité est faible que les deux satellites soient si proches pendant plus d'une brève période. Ainsi la limite de la puissance surfacique obtenue dans le cas *a)* est également admissible dans le cas *b)*.

3.7 *Brouillage causé aux stations de radioastronomie par les stations terriennes*

Le Rapport 224 étudie le problème des brouillages causés aux stations terriennes de radioastronomie. Il fixe un objectif en matière de brouillages, à savoir leur réduction au point où les incertitudes imputables au signal brouilleur représentent moins de 10% de celles qui proviennent des fluctuations statistiques du niveau de sortie du récepteur, les deux signaux étant intégrés pendant une durée de 2000 s dans une largeur de bande appropriée. Les considérants de l'Avis 314 sont également pertinents. En appliquant ces critères, la puissance limite de brouillage à l'entrée du récepteur dans des cas typiques est approximativement la suivante:

- pour les mesures de la partie continue du spectre, -207 dBW dans une largeur de bande de 10 MHz à 2,7 GHz, augmentant jusqu'à -192 dBW dans une largeur de bande de 400 MHz à 24 GHz;
- pour les mesures des raies spectrales, -222 dBW dans une largeur de bande de 10 kHz à 1,7 GHz, augmentant jusqu'à -209 dBW dans une largeur de bande de 100 kHz à 22 GHz.

Si l'on admet que le gain de l'antenne de radioastronomie dans la direction de la source du brouillage est de 0 dB, les rayonnements non essentiels ayant une densité de p.i.r.e. inférieure aux valeurs suivantes ne devraient pas entraîner le dépassement de ces niveaux admis pendant plus de 0,01% du temps dans les cas typiques mentionnés ci-dessus lorsque les stations sont situées à des intervalles de 100 km (ou 250 km), le trajet entre stations étant terrestre:

- pour les mesures de la partie continue du spectre: -75 (ou -50) dB(W/10 MHz) à 100 km (ou 250 km) à 2,7 GHz et -36 (ou -2) dB(W/400 MHz) à 100 km (ou 250 km) à 24 GHz;
- pour les mesures des raies spectrales: -96 (ou -71) dB(W/10 kHz) à 100 km (ou 250 km) à 1,7 GHz et -53 (ou -19) dB(W/100 kHz) à 100 km (ou 250 km) à 22 GHz.

3.8 *Brouillage causé aux stations de radioastronomie par les stations spatiales*

Comme dans le § 3.7, on peut appliquer les critères de brouillage du Rapport 224. Dans de nombreux cas de brouillage, il a été reconnu qu'il n'était nécessaire d'assurer une protection conforme aux normes requises que lorsque les brouillages affectent les lobes latéraux de l'antenne de radioastronomie, dans l'hypothèse où le gain est de 0 dBi. Dans ces conditions, la puissance surfacique d'un signal brouilleur ne devrait pas dépasser, dans les deux bandes de radioastronomie prises à titre d'exemple, les valeurs ci-après:

2700 MHz	-247 dB(W/(m^2 · Hz))
15,4 GHz	-233 dB(W/(m^2 · Hz))

Les valeurs correspondant à d'autres fréquences peuvent être tirées du Rapport 224. Ces valeurs sont spécifiées comme étant nécessaires pour assurer la protection des mesures de la partie continue du spectre; elles peuvent être réduites de 10 à 15 dB pour les mesures des raies spectrales lorsque le temps d'intégration est le même, mais il est courant d'utiliser pour les raies des temps d'intégration beaucoup plus longs qui réduisent l'écart.

Si l'on prend maintenant l'exemple d'un émetteur du service fixe par satellite fonctionnant sur 4 GHz, la puissance surfacique maximale à la surface de la Terre est de -142 dB(W/m^2) dans toute bande large de 4 kHz, pour des angles de site supérieurs à 25°, cette limite étant imposée pour protéger les services de Terre dans les bandes partagées (voir le numéro 2566 du Règlement des radiocommunications). Etant donné que le niveau de protection recommandé pour la radioastronomie à 2700 MHz, par exemple, correspond à -211 dB(W/(m^2 · 4 kHz)), les critères de protection sont respectés si les rayonnements non essentiels dans la bande de radioastronomie sont inférieurs de 69 dB au niveau maximal admis de la puissance surfacique du signal utile.

Il convient cependant de faire remarquer que les critères fixés dans le Rapport 224 sont acceptables pour des brouillages provenant d'un émetteur de Terre, même pour une seule source de brouillage dans le ciel, mais que l'apparition possible d'un brouillage dû à une série de satellites répartis sur l'orbite des satellites géostationnaires crée une nouvelle situation. On peut déduire du diagramme de rayonnement recommandé dans l'Avis 465 que, si chaque satellite satisfaisait tout juste aux critères du Rapport 224, les observations radioastronomiques portant sur la zone du ciel comprise entre $\pm 20°$ par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires auraient à subir continuellement des brouillages nuisibles. Il serait évidemment très utile au service de radioastronomie que des critères de protection plus stricts soient fixés. Une réduction de 10 dB du rayonnement non essentiel (qui est de -69 dB par rapport au signal principal) ramènerait la région «interdite» à $\pm 8°$ et une nouvelle réduction de 10 dB la ramènerait à $\pm 3°$. Il est, de toute évidence, nécessaire de déterminer s'il est possible d'obtenir un rayonnement non essentiel minimal qui soit compatible avec le bon fonctionnement du service fixe par satellite.

3.9 *Brouillages causés aux stations terriennes de recherche spatiale par les stations terriennes*

L'Avis 365-3 (Kyoto, 1978) propose, pour les stations terriennes destinées à la recherche spatiale, une limite de brouillage de -220 dB(W/Hz) aux fréquences supérieures à 1 GHz, cette valeur ne devant pas être dépassée pendant plus de 5 min d'un jour quelconque. Cela est d'ordinaire interprété comme représentant une protection pour 0,001% du temps. Si un signal brouilleur possède un spectre à peu près uniforme dans une bande de 4 kHz, cette limite passe à -184 dB(W/4 kHz). A 100 km, la puissance rayonnée par une source potentielle de brouillage devra, par exemple, être inférieure à -56 dB(W/4 kHz) à une fréquence d'exploitation d'environ 2 GHz.

Pour la réception des signaux provenant de satellites proches de la Terre, ce niveau de brouillage est normalement acceptable pendant 0,1% du temps, ce qui permettrait d'augmenter la p.i.r.e. brouilleuse d'environ 3 dB (Avis 364). Toutefois, pour les missions habitées, les marges de sécurité supplémentaires requises exigent le même degré de protection que pour les missions dans l'espace lointain (Avis 364).

3.10 *Brouillage causé aux stations terriennes de recherche spatiale par les stations spatiales*

Les textes du CCIR fournissent peu de renseignements sur lesquels pourrait être fondée une évaluation des niveaux acceptables de brouillages dus aux satellites. Le Rapport 536 indique que le niveau du bruit thermique d'une station réceptrice située dans l'espace lointain est de l'ordre de -214 dB(W/Hz). Si le brouillage continu causé à cette station n'est pas inférieur, par exemple, de plus de 20 dB au bruit thermique, la p.i.r.e. brouilleuse émise par un satellite géostationnaire ne doit pas dépasser environ -104 dB(W/Hz). Cela suppose l'existence d'une antenne réceptrice fonctionnant à environ 2 GHz et dont le gain du faisceau principal est de 60 dB.

4. Présentation des limites

L'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications exprime les niveaux maximaux tolérés des rayonnements non essentiels par le niveau de puissance moyenne de toute composante non essentielle fournie par l'émetteur à la ligne d'alimentation de l'antenne. Il spécifie les niveaux maximaux tolérés de deux manières. En premier lieu, pour toute composante non essentielle, l'affaiblissement minimum requis est exprimé par la puissance moyenne à l'intérieur de la largeur de bande nécessaire par rapport à la puissance moyenne de la composante non essentielle considérée. En second lieu, pour cette même composante non essentielle, le niveau absolu de puissance moyenne ne doit pas dépasser une valeur spécifiée.

La Recommandation N° 66 de la CAMR-79 recommande d'autre part que tout nouveau niveau maximum toléré d'un rayonnement non essentiel soit exprimé comme il vient d'être dit. Elle recommande néanmoins que le CCIR établisse des techniques de mesure appropriées pour les émissions à large bande ainsi que la possibilité d'application de largeurs de bande de référence pour les mesures.

C'est ainsi que cette même Recommandation souligne la nécessité de catégoriser les rayonnements non essentiels d'après leur «puissance moyenne» et, pour le CCIR, d'élaborer des Avis appropriés pour faciliter l'interprétation et la mesure de cette «puissance moyenne» pour les diverses catégories d'émission.

5. Conclusions

5.1 *Rayonnements non essentiels en provenance de stations spatiales du service fixe par satellite*

On peut tirer de cet examen préliminaire les conclusions très provisoires suivantes:

- La probabilité que des perturbations soient causées aux stations de faisceaux hertziens de Terre par des rayonnements non essentiels provenant des stations spatiales du service fixe par satellite semble assez faible; néanmoins, il faudra poursuivre l'étude des niveaux de rayonnement et de leurs effets cumulatifs.
- Il pourra être nécessaire de limiter l'émission, par les satellites, de produits d'intermodulation dans le voisinage immédiat de la bande occupée, afin d'éviter que des perturbations significatives ne soient causées aux stations terriennes du service fixe utilisant un satellite situé à proximité et occupant une bande de fréquences adjacente, et les mêmes mesures devront peut-être s'appliquer lorsque des faisceaux hertziens transhorizon utilisent une bande de fréquences adjacente. Cependant, il semble probable que les stations de

radioastronomie sont soumises à des perturbations importantes, provoquées par les rayonnements harmoniques directs et éventuellement par les signaux conjugués, par les harmoniques de l'oscillateur local et par des rayonnements non essentiels en provenance des stations spatiales du service fixe par satellite, ainsi que par des émissions d'intermodulation lorsque le service de radioastronomie et le service fixe par satellite ont reçu en attribution des bandes de fréquences adjacentes. Les brouillages pénétrant dans les lobes latéraux extrêmes des antennes des stations de radioastronomie peuvent aussi entraîner des difficultés sérieuses, mais en pareil cas il est peut-être plus facile de trouver une solution à ce problème.

5.2 *Rayonnements non essentiels en provenance de stations terriennes du service fixe par satellite*

Des niveaux de brouillage supérieurs aux normes que l'on considère comme admissibles peuvent être causés à certains types de stations de réception par des rayonnements non essentiels provenant de stations terriennes du service fixe par satellite, notamment selon la distance séparant les stations brouillées et brouilleuses. Ainsi, les perturbations peuvent être significatives à des distances de quelques dizaines de kilomètres pour les stations réceptrices de faisceaux hertziens et à des distances de quelques centaines de kilomètres pour les stations de réception transhorizon et pour les stations du service de radioastronomie, les autres stations terriennes du service fixe par satellite étant susceptibles de subir des perturbations de valeur intermédiaire. Les autres services utilisant des stations très sensibles aux brouillages ne sont pas pris en considération dans le présent Rapport, mais il faudra peut-être en tenir compte également.

5.3 *Considérations générales*

Avant de pouvoir établir des Avis relatifs à la limitation des rayonnements non essentiels en provenance des stations spatiales et terriennes du service fixe par satellite, il convient que les Commissions d'études intéressées poursuivent l'étude des points suivants:

5.3.1 recenser tous les services dont les stations peuvent être sensibles aux brouillages causés par ces rayonnements et déterminer, avec une précision suffisante, les niveaux de brouillage qui peuvent être autorisés et les gammes de fréquences pertinentes, eu égard aux possibilités de brouillage par d'autres sources et à divers facteurs, comme le pourcentage de temps pendant lequel le brouillage est présent, ainsi que la largeur de bande et la durée dans lesquelles le brouillage doit être intégré;

5.3.2 déterminer les niveaux des rayonnements non essentiels qui proviendraient des stations spatiales et terriennes du service fixe par satellite dans les diverses bandes de fréquences et les densités de p.i.r.e. des rayonnements non essentiels des stations terriennes, notamment dans la direction de l'horizon;

5.3.3 étudier les limites des rayonnements non essentiels en fonction de la séparation des fréquences, notamment en ce qui concerne les bandes de fréquences adjacentes;

5.3.4 déterminer s'il est nécessaire et, dans ce cas, dans quelle mesure il est possible au point de vue technique et économique d'obtenir, par rapport aux niveaux mentionnés au § 5.3.2, des niveaux en général plus favorables à toutes les fréquences. Il pourrait, d'autre part, être souhaitable d'imposer des limites plus sévères aux rayonnements non essentiels dans les bandes de fréquences qui sont attribuées à des services utilisant des récepteurs particulièrement sensibles, et des limites plus souples à d'autres fréquences;

5.3.5 établir des méthodes de mesure des rayonnements non essentiels, examiner la question de savoir s'il convient de fixer des largeurs de bande de mesure de référence, étudier le classement des rayonnements non essentiels selon leur puissance moyenne ainsi que leur interprétation telle qu'elle s'applique aux diverses classes d'émission.

Il peut également être souhaitable d'étudier des dispositions permettant de limiter dans certains cas le niveau des émissions hors bande.

ANNEXE I

1. Calcul des valeurs de la puissance surfacique admissible

Les hypothèses suivantes ont été adoptées pour le calcul des valeurs de la puissance surfacique admissible:

- Pour protéger les bandes du service fixe par satellite au-dessous de 15,4 GHz, les valeurs de la puissance surfacique sont calculées pour la fréquence 4 GHz. Pour protéger les bandes du service fixe par satellite au-dessus de 15,4 GHz, les valeurs de la puissance surfacique sont calculées pour la fréquence 19 GHz.
- Le réseau à satellite utile emploie des émissions téléphoniques MRF-MF avec une contribution de bruit thermique sur la liaison descendante de 5000 pW0p.
- Le brouillage maximal admissible causé par les rayonnements non essentiels dans une voie téléphonique est de 50 pW0p.
- Le gain de l'antenne de la station terrienne (G_e) est 60 dB à la fréquence 4 GHz et 64 dB à la fréquence 19 GHz.

– La température de bruit du système de la station terrienne (T_s) est 60 K à la fréquence 4 GHz et 250 K à la fréquence 19 GHz.
– La largeur de bande de référence (B) est 4 kHz à la fréquence 4 GHz et 1 MHz à la fréquence 19 GHz.

Avec les hypothèses qui précèdent, la puissance surfacique de brouillage maximale admissible due à un rayonnement non essentiel est donnée par:

$$10 \log kT_sB + 10 \log \frac{50}{5000} - G_e - 10 \log \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

soit

-221 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) à la fréquence 4 GHz

et $-181{,}6$ dB(W/(m^2 · MHz)) à la fréquence 19 GHz.

2. Espacement requis entre deux satellites géostationnaires

D'après le § 1 ci-dessus, il convient que la densité spectrale de puissance surfacique ne dépasse pas -221 dB(W/(m^2 · 4 kHz)) à la fréquence 4 GHz. Cela correspond, à l'entrée du récepteur de la station terrienne, à une puissance surfacique spectrale de -195 dB(W/4 kHz) et une p.i.r.e. de brouillage rayonnée par un satellite stationnaire de -58 dB(W/4 kHz).

Les hypothèses suivantes sont formulées en plus de celles qui figurent dans le § 1:

– Le gain de l'antenne du satellite utile dans la direction du satellite brouilleur est 0 dB par rapport à l'antenne isotrope.
– Le gain de transmission du système utile, depuis l'entrée du récepteur du satellite utile jusqu'à la sortie de l'antenne de la station terrienne, est -20 dB.
– La densité spectrale de p.i.r.e. du rayonnement non essentiel à la fréquence de réception du satellite utile est -58 dB(W/4 kHz).

L'affaiblissement le long du trajet entre les deux satellites est égal à 20 log 4 $\pi d/\lambda$.

Alors, si la densité de la puissance de brouillage à l'entrée du récepteur de la station terrienne ne peut pas dépasser -195 dB(W/4 kHz),

$$-195 \leqslant -58 - 20 - 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

par conséquent, $d \geqslant 4$ km.

A la fréquence 4 GHz, la séparation géocentrique correspondante est $5{,}7 \times 10^{-3}$ degrés. A la fréquence 19 GHz, les distances minimales d'espacement des satellites seraient moindres.

RAPPORT 874

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LE SERVICE INTER-SATELLITES LORSQU'IL EST UTILISÉ PAR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET D'AUTRES SERVICES SPATIAUX

(Programme d'études 2P/4)

(1982)

1. Introduction

Il est vraisemblable que les liaisons inter-satellites joueront un rôle de plus en plus important dans l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires par le service fixe par satellite. Cela étant et, compte tenu du fait que, tout en constituant un service particulier (le service inter-satellites), ces liaisons tirent exclusivement leur existence et leur utilité de l'existence d'autres services spatiaux, elles imposeront nécessairement leurs caractéristiques et leurs contraintes propres aux services qui les utiliseront.

Le présent Rapport étudie les aspects techniques et opérationnels du partage entre liaisons du service inter-satellites dans le cadre de leur utilisation pour des systèmes du service fixe par satellite.

2. Partage avec le service d'exploration de la Terre par satellite (passif) et avec le service de recherche spatiale (passif)

La CAMR-79 a attribué les bandes de fréquences 54,25-58,20 GHz, 116,00-126,00 GHz et 174,5-176,5 GHz à la fois au service inter-satellites et au service d'exploration de la Terre (passif) et au service de recherche spatiale (passif).

Dans la mesure où ces services spatiaux recourent à des stations spatiales non géostationnaires, le brouillage dû à une liaison inter-satellites entre un satellite géostationnaire et un satellite non géostationnaire est un problème statistique et il est pratiquement inutile d'imposer des contraintes de partage à l'un ou l'autre des services concernés. Néanmoins, compte tenu de la rareté des travaux d'évaluation du problème du partage, il est nécessaire de poursuivre les études à ce sujet, particulièrement dans le cas où les systèmes brouilleurs utilisent l'orbite des satellites géostationnaires.

3. Partage avec le service de radiodiffusion par satellite

La CAMR-79 a attribué la bande de fréquences 22,55-23,00 GHz à la fois au service inter-satellites (SIS) et au service de radiodiffusion par satellite (SRS) dans les Régions 2 et 3.

Le Rapport 951 étudie la probabilité et la gravité des brouillages occasionnés par des satellites de radiodiffusion à p.i.r.e. relativement élevée à des récepteurs du service inter-satellites intégrés dans une liaison inter-satellites géostationnaires.

Les hypothèses formulées dans le Rapport 951 sont:

3.1 pour la liaison inter-satellites:

- ouverture angulaire de l'antenne de réception à mi-puissance (faisceau à section circulaire) à 1°;
- température de bruit du système de réception: 1000 K;
- lobe latéral du faisceau de l'antenne de réception conforme au lobe composé des courbes A, B, et C de la Fig. 11 du Rapport 558;
- pour le brouillage, un objectif maximum de -10 dB pour le rapport I/N dans une largeur de bande de 40 MHz;

3.2 pour le satellite de radiodiffusion:

- une p.i.r.e. maximale de 70 dBW dans le faisceau principal;
- une ouverture angulaire du faisceau de l'antenne d'émission à mi-puissance (faisceau à section circulaire): 2,5°;
- pour l'antenne d'émission, un lobe latéral conforme au lobe stipulé par la CAMR-RS-77.

3.3 Compte tenu des résultats obtenus, on arrive à la conclusion suivante:

- qu'il est possible de partager les fréquences susmentionnées entre le service de radiodiffusion par satellite et le service inter-satellites dans la bande de fréquences en cause s'il est possible de coordonner les positions sur l'orbite;
- que, par les liaisons inter-satellites plus longues (jusqu'à environ 7° d'arc), il devient possible de placer un satellite de radiodiffusion entre les deux satellites constituant la liaison inter-satellites;
- que dans le cas d'une liaison inter-satellites plus longue, il devient possible d'introduire un ou plusieurs satellites de radiodiffusion entre les deux satellites terminaux de la liaison inter-satellites en fonction de la longueur réelle de la liaison inter-satellites;
- que, plus la longueur d'une liaison inter-satellites est grande, plus large sera la portion de l'arc orbital dans laquelle des satellites de radiodiffusion pourraient être placés en respectant l'objectif de brouillage admis comme hypothèse pour la liaison inter-satellites;
- pour ce qui est du brouillage susceptible d'être causé au récepteur SRS par une émission SIS, il est possible qu'il ne s'en produise pas du fait des liaisons SIS à courte distance, avec antenne de poursuite; toutefois, le cas de brouillage le plus défavorable peut se présenter du fait de liaisons SIS à courte distance, sans antenne de poursuite, si l'espacement orbital entre deux satellites SIS es inférieur à 6° et presque nul entre deux satellites SRS et SIS. Le brouillage causé par des liaisons inter-satellites avec des antennes de poursuite à effets réciproques peut être acceptable lorsque l'ouverture de faisceau n'est pas plus de deux fois supérieure environ aux erreurs de pointage prévues (voir le Tableau II du Rapport 951);
- étant donné l'arc orbital limité disponible et les possibilités importantes de réutilisation des fréquences dans le service inter-satellites (voir la Fig. 3 de l'Annexe II au Rapport 451), il peut y avoir de graves conflits entre les stations spatiales des deux services, pour le même arc orbital.

Les conceptions d'un satellite de radiodiffusion et de la liaison inter-satellites risquant de différer des hypothèses formulées ci-dessus, il serait souhaitable de poursuivre les études et de disposer de renseignements nouveaux sur la question.

RAPPORT 875 *

ÉTUDE DES ANNULEURS DE BROUILLAGE POUR APPLICATION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(Programme d'études 2J/4)

(1982)

1. Introduction

Les brouillages mutuels entre réseaux à satellite desservant la même zone géographique ou des zones géographiques adjacentes sont un des principaux obstacles à une meilleure utilisation du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires par le service fixe par satellite (SFS). On s'est surtout attaché aux caractéristiques de rayonnement des antennes des stations terriennes afin de réduire l'espacement des satellites sur l'orbite. D'autres méthodes permettant d'augmenter la capacité de communication font intervenir des techniques de réutilisation des fréquences telles que la transmission à polarisations croisées dans la même voie, des techniques de modulation améliorées, des émetteurs de satellite à grande puissance et des récepteurs à faible bruit, pour n'en citer que quelques-unes. Les paramètres techniques correspondants sont indiqués dans le Rapport 453.

Certaines de ces techniques augmentent la vulnérabilité des réseaux à satellite aux brouillages mutuels en sorte que leur efficacité se mesure en fonction de la qualité de fonctionnement globale du système à améliorer. Cependant, les effets nuisibles de certaines de ces techniques peuvent être réduits par l'emploi d'annuleurs de brouillage. Ces derniers sont passés par une longue période de mise au point portant sur des technologies connexes nécessitant la mise en œuvre d'équipements relativement coûteux surtout du fait que leurs applications étaient liées à des situations de brouillage jugées délibérées et hostiles. Tel n'est toutefois pas le cas pour les systèmes de télécommunication intérieurs ou internationaux de caractère commercial où les caractéristiques de base des radiofréquences des systèmes brouilleurs potentiels sont connues. Il est ainsi possible d'insérer des dispositifs de suppression du brouillage qui soient rentables. Certaines réalisations récentes, applicables au système de télécommunication par satellite, font l'objet des paragraphes qui suivent.

2. Applications générales

Il existe deux grandes sources de brouillage pour lesquelles on applique des annuleurs. L'une est essentiellement due aux phénomènes de l'environnement, par exemple les fortes précipitations, qui altèrent les caractéristiques du signal d'un système pendant la transmission sur la liaison montante et sur la liaison descendante. Les systèmes utilisant des voies à polarisation croisée dans la même bande de fréquences – notamment au-dessus de 10 GHz – sont vulnérables à ce type de brouillage à l'intérieur du système. Les distorsions se présentent sous la forme de différences d'affaiblissement et de déphasage dans les composantes orthogonales du signal qui dégradent les niveaux initiaux de discrimination de polarisation. Des dispositifs ont été mis au point qui corrigent les effets de la dépolarisation et éliminent pratiquement les éléments non orthogonaux dans les voies perturbées. Ces techniques sont examinées dans le Rapport 555 et les références [White et autres, 1975; Chu, 1971; Persinger et autres, 1981; Nouri et Braine, 1980; Pelchat et Baird, 1977].

L'autre source plus fréquente de brouillage provient de systèmes extérieurs fonctionnant dans la même bande de fréquences dans le champ de vision du système désiré. On assure la protection contre les brouillages entre satellites essentiellement par la discrimination de l'antenne de la station terrienne. Cependant, d'autres techniques peuvent contribuer à réduire le brouillage ou ses effets.

Les annuleurs de brouillage reposent sur le principe de base suivant: on établit la réplique d'un signal brouilleur tant en amplitude qu'en phase et on la soustrait du signal utile et du brouillage qui entrent dans le système récepteur (voir le Rapport 390, Annexe I). Des études et des expériences ont été faites, puis évaluées, sur les techniques de suppression au niveau de la bande de base, de la fréquence intermédiaire et des radiofréquences [Pontano, 1980; Pontano et Fuenzalida, 1971; American Nucleonics Corporation, 1974; Horton, 1976; Shklarsky et autres, 1979; White et autres, 1975]. Les techniques préférées sont affectées par les caractéristiques des signaux utiles et des signaux brouilleurs, l'état de la technique et le coût de leur mise en œuvre. Il ne fait aucun doute que les annuleurs prendront de plus en plus d'importance à mesure que l'arc orbital sera occupé par un nombre sans cesse croissant de satellites de télécommunication.

3. Exemples d'annuleurs de brouillage

On trouvera ci-après quelques exemples de ces techniques dont il a été récemment fait état dans les publications techniques. Les résultats obtenus par les divers chercheurs proviennent d'expériences exemptes de tout bruit thermique important.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 1.

3.1 *Annuleurs de brouillage au niveau de la bande de base*

Pour les porteuses à modulation angulaire, on a mis au point une méthode de suppression du brouillage au niveau de la bande de base [Pontano, 1980] en mélangeant les signaux radioélectriques utiles et brouilleurs dans le système expérimental représenté à la Fig. 1. Il convient ici de noter qu'avec cette méthode il faut que le signal brouilleur soit reçu directement en tant que signal d'entrée de la voie brouilleuse. On peut y parvenir en pointant directement une antenne séparée sur la source de brouillage. Le signal brouilleur est mélangé à la porteuse utile au niveau des radiofréquences ou de la fréquence intermédiaire. On a pu démontrer que les composantes basses fréquences qui en résultent sont la réplique du brouillage au niveau de la bande de base. On a pu supprimer le brouillage en soustrayant cette réplique de la somme du signal de bande de base et du signal brouilleur démodulés. Des essais en laboratoire ont montré que cette méthode réduisait le brouillage d'environ 15 dB pour une large gamme de paramètres d'exploitation.

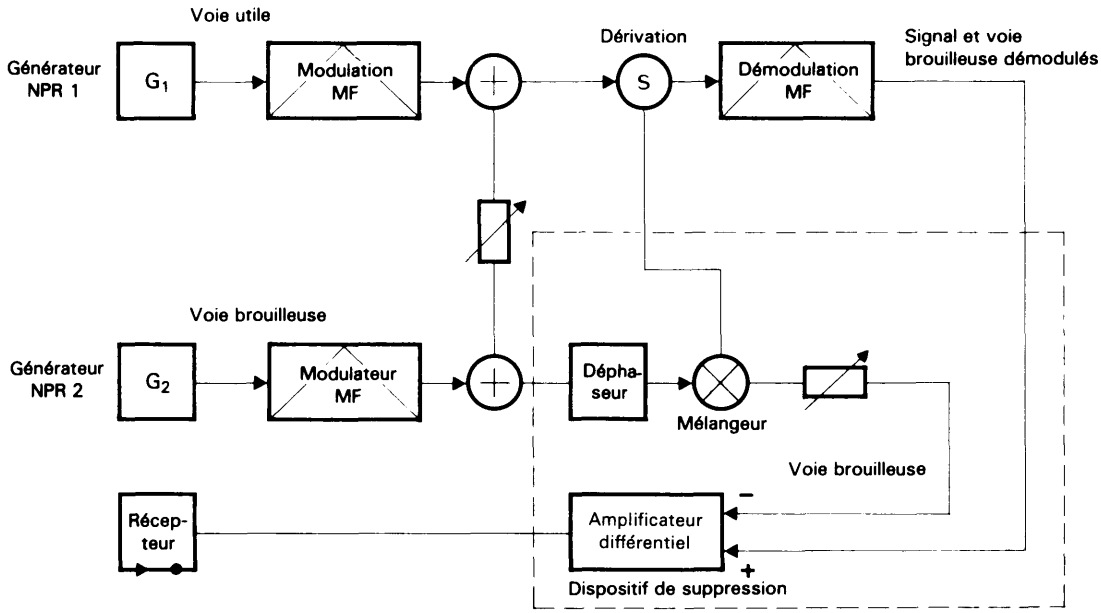


FIGURE 1 — *Schéma de principe du dispositif d'essais*

Pour les cas où il n'y a pas de signal brouilleur séparé assurant un moyen de contrôle ou de référence, on a proposé une autre technique pour les signaux à modulation angulaire [Pontano et Fuenzalida, 1971]. Dans cette méthode, on utilise l'information contenue dans le signal d'enveloppe des porteuses utile et brouilleuse combinées pour reconstituer le brouillage dans la bande de base. Pour avoir une bonne suppression du brouillage, la source de brouillage doit être séparée de la porteuse utile par la somme des fréquences de modulation les plus élevées. Les études et les expériences ont montré que la somme de l'enveloppe détectée de la porteuse utile et de la porteuse brouilleuse est égale à la composante du brouillage démodulé déphasée de $\pm$ 90°. Une fois identifié, le brouillage peut être éliminé par soustraction. On a réussi à obtenir une réduction du brouillage de 15 dB pour une gamme de paramètres employés dans les essais (espacement entre fréquences, rapports porteuse/brouillage, et indices de modulation). On a obtenu les meilleurs résultats avec de faibles indices de modulation et de grands espacements entre fréquences porteuses.

Pour les signaux modulés en fréquences (MF) où le signal brouilleur est faible et ne peut être reçu séparément, il est possible de détecter le brouillage au niveau de la bande de base à l'aide d'un détecteur à quartz. Un signal MF pur a une enveloppe constante et l'addition du brouillage se traduit par une modulation d'amplitude qu'il est possible de détecter et donc d'éliminer par soustraction. Cependant, dans les essais de laboratoire, cette technique n'a permis de supprimmer que les composantes de brouillage qui n'avaient pas subi de mutation spectrale. Etant donné que l'on n'a la certitude de supprimer que la composante du premier ordre, le brouillage doit être faible par rapport au signal utile MF.

Les termes d'ordre plus élevé deviennent gênants si la puissance de brouillage est importante. Ils limitent le degré de suppression du brouillage que l'on peut obtenir avec une technique de suppression au niveau de la bande de base, la mise en phase requise pour supprimer le terme du premier ordre n'étant pas la même que celle qui est requise pour supprimer les termes d'ordre supérieur. Dans ces conditions, mieux vaut supprimer le brouillage au niveau des radiofréquences ou de la fréquence intermédiaire avant démodulation, tous les ordres du spectre de brouillage dans la bande de base se trouvant alors supprimés.

3.2 *Annulation au niveau de la fréquence intermédiaire*

Une autre technique qui a été l'objet de recherches pour les systèmes à modulation de fréquence consistait à soustraire le spectre de la fréquence intermédiaire ou des radiofréquences d'un signal brouilleur avant le démodulateur du récepteur comme indiqué dans le dispositif d'essai de la Fig. 2. On a postulé dans ce cas que le signal brouilleur pouvait être capté séparément. Il convient de souligner que la voie auxiliaire (brouillage uniquement) nécessitait un abaissement de fréquence et un filtrage pratiquement identiques à ceux de la voie principale (signal utile plus brouillage). De même, les longueurs électriques du signal brouilleur dans les deux voies devaient être pratiquement identiques pour que la modulation des deux signaux au point de suppression soit cohérente. La mise en phase du signal de suppression a été améliorée à l'aide d'un changeur de phase variable. Les résultats des essais ont montré que le spectre de brouillage au niveau de la fréquence intermédiaire était réduit d'environ 25 à 30 dB sur toute la largeur de bande du filtre FI. Les avantages de cette technique étaient:

- la simplicité,
- la suppression simultanée des termes du premier ordre et des termes d'ordre supérieur,
- la possibilité d'assurer la suppression avec n'importe quelle valeur de C/I,
- un bruit impulsif plus faible qu'avec les méthodes de suppression au niveau de la bande de base.

3.3 *Pont d'annulation du brouillage*

Une autre technique passive, démontrée lors d'essais en laboratoire, fait intervenir un réseau à pont pour supprimer le signal brouilleur au niveau du récepteur à l'aide d'un signal auxiliaire obtenu à partir d'une voie brouilleuse. On trouvera à la Fig. 3 un schéma de principe de ce dispositif. Théoriquement, l'angle de phase du signal de sortie du circuit en pont doit rester à 180° et son amplitude doit rester égale au brouillage sur toute la bande des fréquences utiles, et ce, de façon permanente. L'objectif des essais était de déterminer la qualité de fonctionnement du système pour diverses erreurs d'angle de phase et d'amplitude produites par le pont.

Les essais ont été menés à l'aide d'une tonalité de signalisation à quelque 3807 MHz et de signaux de brouillage à 3809 $\pm$ 4,5 MHz et 3950 MHz. Cette technique a permis d'affaiblir les signaux brouilleurs de 15 dB à 50 dB, le dernier chiffre correspondant à des signaux brouilleurs dans une bande relativement étroite et par beau temps.

3.4 *Systèmes d'annulation adaptables*

Des systèmes d'annulation actifs ou asservis, capables d'assurer des réductions de brouillage de l'ordre de 50 à 60 dB ont été mis au point et exploités depuis plusieurs années pour des fréquences allant des ondes myriamétriques (3-30 kHz) aux ondes centimétriques (3-30 GHz) [American Nucleonics Corporation, 1974]. Les applications ont également porté sur les brouillages provenant d'un même point, où la source de brouillage est un émetteur voisin dont les caractéristiques sont connues, et sur le brouillage à distance, dont la source peut être soit fortuite, soit délibérée. Quand il s'agit d'un brouillage à distance, on utilise une antenne auxiliaire pointée vers la source de brouillage pour recueillir un échantillon de référence du brouillage. Dans quelques applications, il est possible d'obtenir ce signal à partir d'un lobe latéral de l'antenne principale. Aux fins de discrimination, on peut faire intervenir diverses propriétés des signaux utiles et des signaux brouilleurs (telles que la direction d'arrivée, l'amplitude, la polarisation, la modulation, etc.). La Fig. 4 donne le schéma de principe de fonctionnement d'un système d'annulation adaptable. L'émetteur brouilleur reproduit le signal brouilleur en amplitude mais avec une polarité inversée. Une boucle fermée d'asservissement assure en permanence un ajustement automatique de l'amplitude, du temps de propagation, et de la phase pour compenser les variations de ces propriétés imputables aux effets de propagation. Un coupleur échantillonne le signal de sortie vers le récepteur et, si l'annulation est imparfaite, un signal d'erreur est envoyé au dispositif d'asservissement. Les boucles d'asservissement à gain élevé ajustent les paramètres de régulation du signal de façon à abaisser le brouillage résiduel vers zéro. Les détecteurs synchrones limitent la réponse de la boucle de commande aux signaux qui sont cohérents avec le signal de référence ou avec le signal brouilleur. L'importance de l'annulation obtenue dépend de la largeur de bande instantanée du signal de brouillage. Pour les signaux à bande étroite, on peut obtenir une annulation de 60 dB. Pour des largeurs de bandes de 5 ou 6 MHz, on a pu abaisser les brouillages éloignés de 50 à 60 dB. Pour les signaux à caractère de bruit ayant des largeurs de bandes instantanées de 500 MHz, une réduction d'environ 20 dB aurait été obtenue.

Un système adaptable d'annulation du brouillage, spécialement mis au point pour les communications par satellite, est représenté à la Fig. 5 [Horton, 1976]. On soustrait de l'ensemble signal utile plus signal brouilleur une réplique estimée du signal brouilleur dans le combineur de puissance situé après l'amplificateur à faible bruit du système récepteur. Le signal de sortie (signal d'erreur) représente le signal utile plus le résidu de l'opération de soustraction. Un filtre adaptable inséré dans la voie brouilleuse ajuste l'amplitude et la phase du signal brouilleur pour fournir cette réplique. L'adaptation s'accomplit à l'aide d'un algorithme faisant intervenir la loi des moindres carrés. Le corrélateur de quadrature traite le signal d'erreur et le signal de brouillage (antenne auxiliaire) pour assurer la corrélation voulue de l'amplitude et de la phase entre ces deux signaux. Les sorties du corrélateur servent de tensions de commande pour les affaiblissements du filtre adaptable.

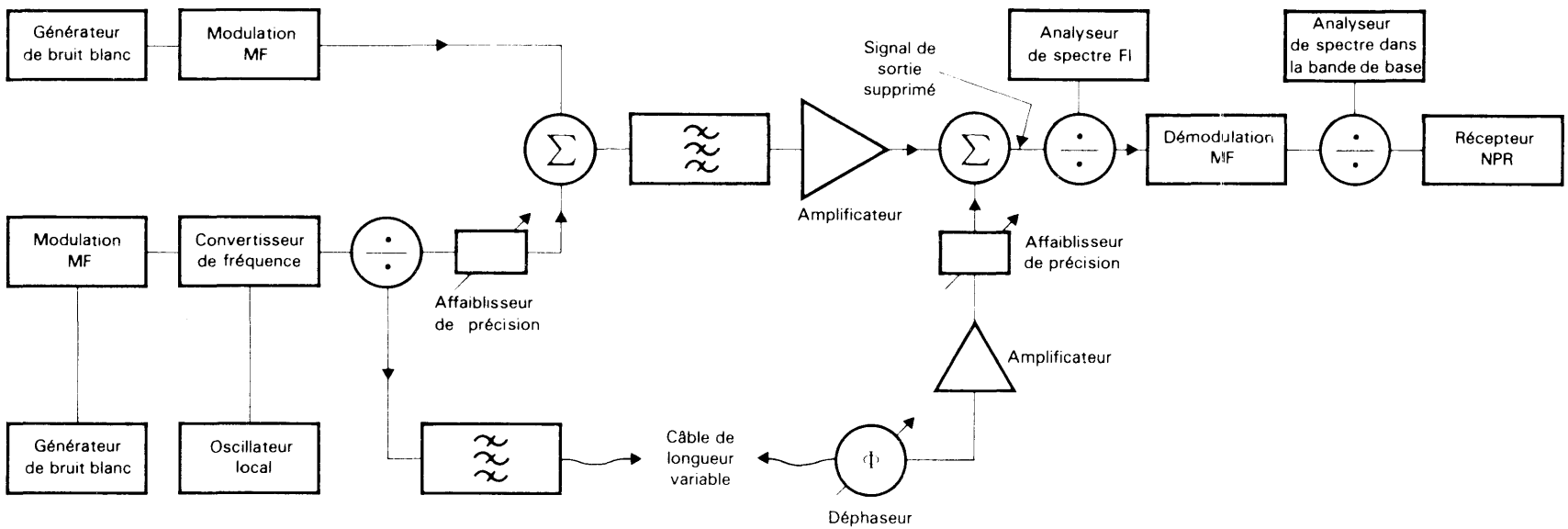
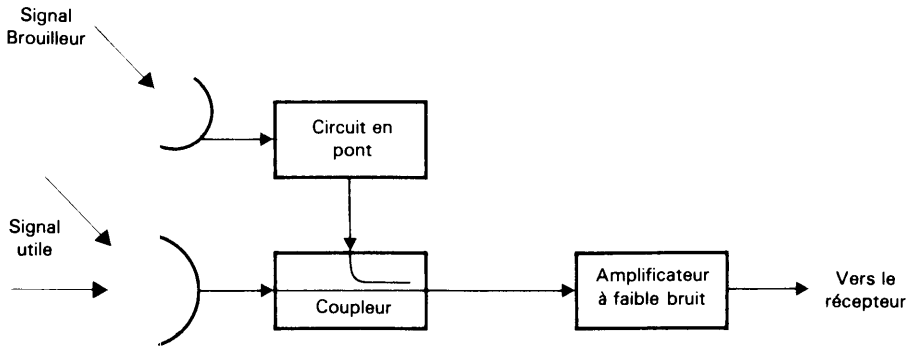
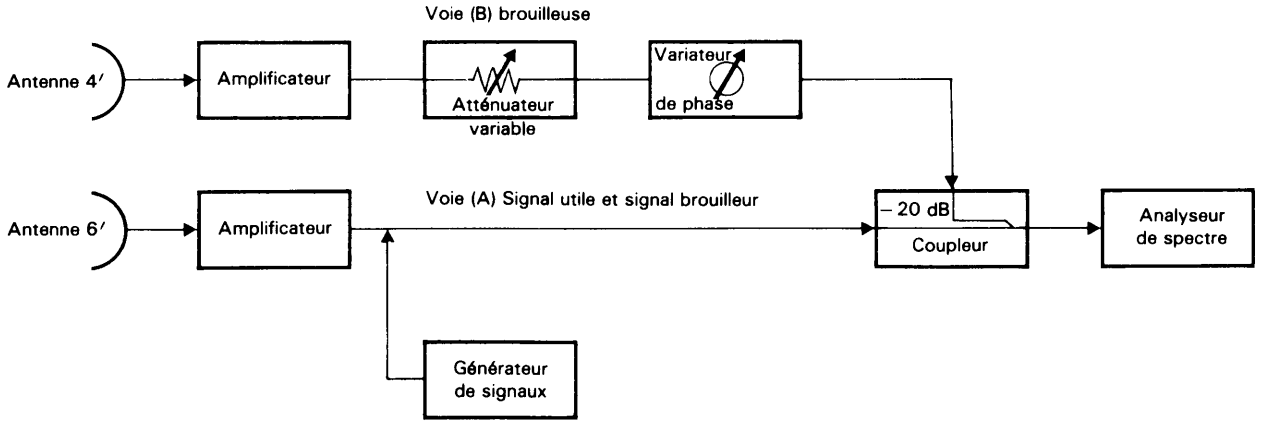


FIGURE 2 — *Dispositif d'essais de suppression au niveau de la fréquence intermédiaire*



a) Schéma du système



b) Dispositif d'essais

FIGURE 3 — *Système de suppression du brouillage avec pont*

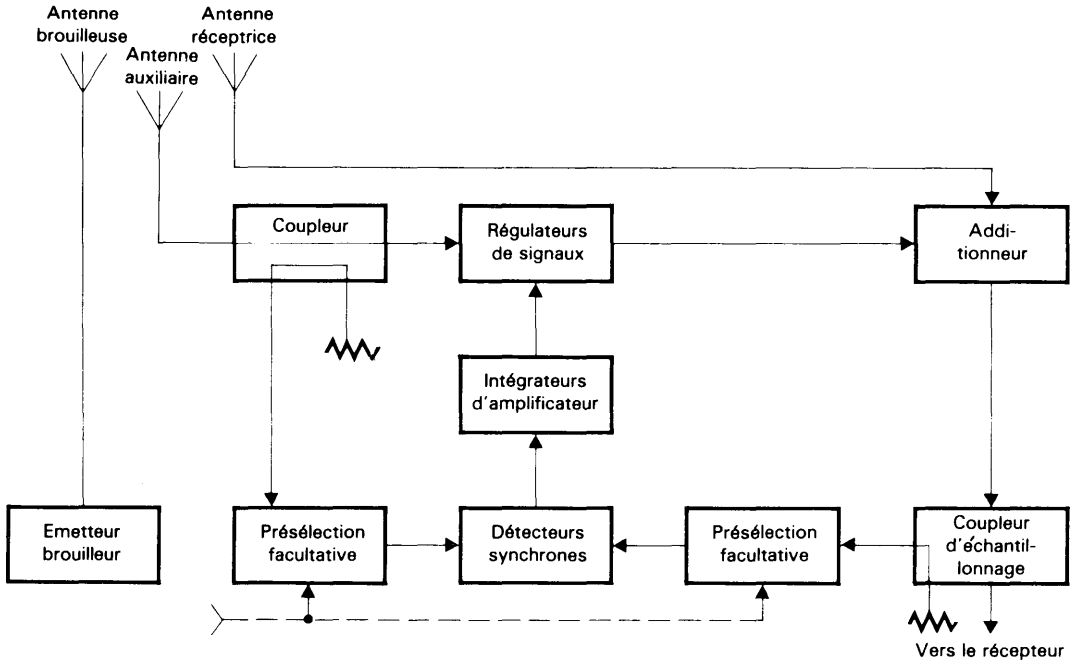


FIGURE 4 — *Système adaptatif de suppression du brouillage*

On parvient au régime permanent lorsque la corrélation a atteint un minimum. Les essais en laboratoire ont montré que l'on pouvait atteindre une annulation du brouillage de 20 à 30 dB selon le niveau du rapport C/I.

Une des premières applications des techniques d'annulation adaptatives est celle qui a été mise en œuvre par le Royaume-Uni lorsque des brouillages importants ont été causés à la station terrienne de Goonhilly par une station de faisceaux hertziens distante d'environ 300 km. Un suppresseur adaptatif réglable fonctionnant à la fréquence intermédiaire a été mis au point et mis en service au début de 1975; il a contribué à réduire les effets des brouillages à un niveau acceptable [White et autres, 1975].

3.5 *Filtrage adaptable du brouillage à bande étroite*

On a appliqué à un système de télécommunication numérique à large bande une technique visant à supprimer les brouillages à bande étroite quand la fréquence du brouilleur est inconnue (et peut même varier lentement) [Shklarsky et autres, 1979]. Le schéma de principe de la Fig. 6 représente la mise en œuvre de cette technique. Le système poursuit la fréquence centrale d'un brouilleur et centre un filtre à coupure brusque autour de cette fréquence. Il fonctionne en utilisant les propriétés de la transformation de Fourier en temps réel des filtres à ondes acoustiques de surface. Les conditions requises sont:

- que la largeur de bande du brouilleur soit inférieure à celle du signal utile, et
- dans le domaine de Fourier, que l'amplitude du brouilleur soit supérieure à celle du signal utile.

Une régulation automatique du gain permet au système de traiter une vaste plage dynamique de signaux d'entrée. Des réductions sensibles du brouillage ont été obtenues lors des essais du système.

4. Conclusions

Les exemples d'annulation de brouillage décrits dans le présent Rapport ne constituent qu'un échantillon des ouvrages actuellement parus sur ce sujet. Cependant, les annuleurs de brouillage, en tant que moyens de réduire les brouillages entre systèmes à satellite en sont encore à leurs débuts. Jusqu'ici, la méthode suivie par l'UIT et recommandée par le CCIR a consisté à imposer des limites au diagramme de rayonnemment des lobes latéraux de l'antenne et à la puissance surfacique rayonnée afin d'éviter que le brouillage entre systèmes ne soit excessif. On a employé des annuleurs de brouillage dans des situations relativement isolées, où une station terrienne existante ou nouvellement construite souffrait d'un brouillage inattendu provenant d'une source proche. La nécessité d'antennes et d'équipements de traitement des signaux supplémentaires est une charge que tout planificateur de réseau de télécommunication préfère éviter. De nouvelles études sont nécessaires pour réduire la complexité de l'équipement et réduire les coûts avant que les annuleurs de brouillage aient une chance d'être largement appliqués dans les systèmes SFS.

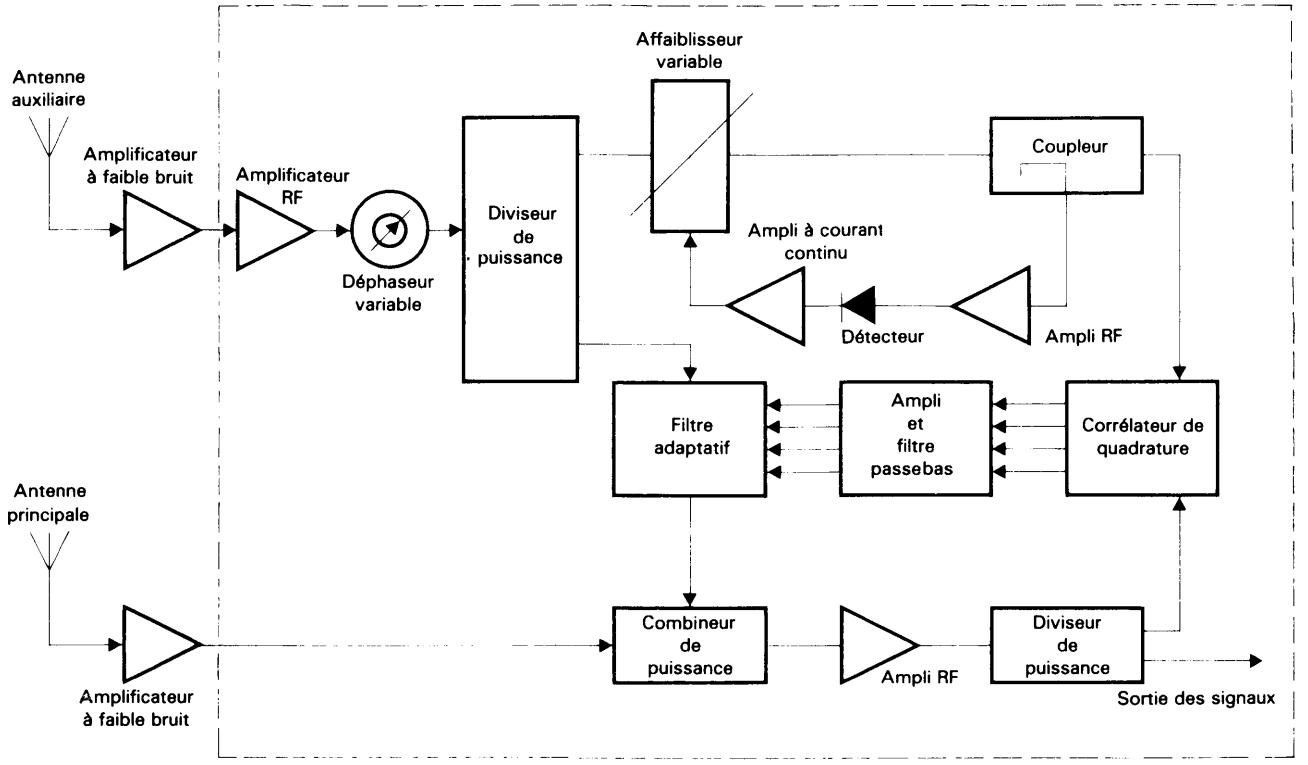


FIGURE 5 — *Schéma de principe du système de suppression du brouillage dans la même voie*

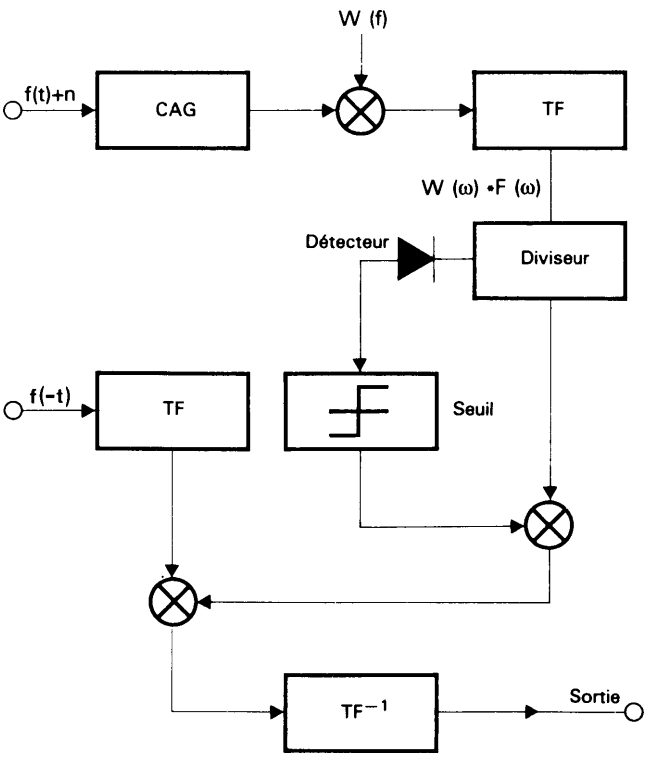


FIGURE 6 — *Schéma de principe d'un système adaptatif*

CAG: commande automatique de gain
TF: transformée de Fourier

Par ailleurs, il semble que la réalisation d'annuleurs de brouillage pour application dans le cadre des systèmes, jointe aux techniques de polarisation croisée, suscite un grand intérêt [Chu, 1971; Persinger et autres, 1981; Nouri et Braine, 1980; Pelchat et Baird, 1977; Makino et autres, 1980]. Etant donné que le signal brouilleur peut être caractérisé et défini intrinsèquement, il est à prévoir que les réalisations dans ce domaine se traduiront dans un proche avenir, par l'apparition sur le marché d'équipements utilisables. Les résultats obtenus avec ce type d'annuleur de brouillage favoriseront vraisemblablement le développement d'applications inter-systèmes.

Le CCIR devrait continuer à étudier ce sujet et à rendre compte des progrès accomplis.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMERICAN NUCLEONICS CORPORATION [1974] New system cuts interference and permits closer channelling. *Microwave System News.*

CHU, T. S. [novembre 1971] Restoring the orthogonality of two polarizations in radio communication systems – I. *BSTJ*, Vol. 50, **9**, 3063-3069.

HORTON, E. D. [29 novembre-1 décembre 1976] An adaptative co-channel interference suppression system to suppress high level interference in satellite communication earth terminals. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '76), Dallas, Texas, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Vol. 1, Session 13, Digital satellite communications, 13.4-1.

MAKINO, H., ORINO, Y., ORUI, S., FUKETA, H. et INOUE, T. [avril 1980] A new adaptative control system for compensating cross-polarization couplings on the up and/or down path in frequency re-use satellite communication systems. AIAA 8th Communications Satellite Systems Conference, Orlando, Florida, Etats-Unis d'Amérique.

NOURI, M. et BRAINE, M. R. [1980] An adaptative interference control system for earth-satellite links above 10 GHz. *Marconi Rev.*, Vol. XLIII, **216**, Premier Trimestre, 14-28.

PELCHAT, M. G. et BAIRD, C. A. [26-28 septembre 1977] Simplified techniques for adaptive polarization crosstalk reduction. IEEE Electronics and Aerospace Systems Convention (EASCON-77), Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, 31-3.

PERSINGER, R. R., GRUNER, R. W., EFFLAND, J. E. et DiFONZO, D. F. [13-16 avril 1981] Operational measurements of a 4/6-GHz adaptive polarization compensation network employing up/down-link correlation algorithms. IEE Second International Conference on Antennas and Propagation, Heslington, York, Royaume-Uni, Conf. Publication No. 195, Part 2: Propagation, 181-187.

PONTANO, B. A. [2 décembre 1980] Methods of interference cancellation for improved orbit and spectrum utilization. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '80), 30 novembre-4 décembre, Houston, Texas, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Vol. 2, Session 33: Recent activities and techniques in efficient orbit utilization, 33.4.1-33.4.5.

PONTANO, B. A. et FUENZALIDA, J. C. [1971] A study of interference between multichannel angle-modulated signals. COMSAT Tech. Memo CL 22-71.

SHKLARSKY, D., DAS, P. et MILSTEIN, L. B. [29 novembre 1979] Adaptive narrowband interference suppression. IEEE National Telecommunications Conference (NTC '79), 27-29 novembre, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, Session 15: New techniques in spread spectrum communications, 15.2.1-15.2.4.

WHITE, N., BRANDWOOD, D. et RAYMOND, G. [avril 1975] The application of interference cancellation to an earth station. Satellite communication system technology. IEE Publication No. 126, 233-238.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

QUESTIONS, PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉSOLUTIONS, VŒUX ET DÉCISIONS

QUESTION 1-2/4

ANTENNES POUR LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1961-1963-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les dimensions des antennes, tant des stations terriennes que des stations spatiales, et les restrictions imposées à l'ouverture de leur faisceau sont des facteurs importants pour la détermination des gammes de fréquences dont peuvent utilement disposer les systèmes spatiaux;

b) que les effets de l'atmosphère et les méthodes de construction ont une influence sur le gain maximal des antennes et sur les ouvertures de faisceau minimales réalisables;

c) que le brouillage pose d'importants problèmes, notamment pour ce qui est de l'efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du partage des bandes de fréquences avec les systèmes des services de Terre;

d) que la réutilisation des fréquences dans les systèmes de radiocommunications spatiales contribuerait beaucoup à l'efficacité d'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques;

e) que l'on sait peu de chose sur les champs rayonnés proches des antennes de station terrienne et sur la manière dont ces champs sont influencés par le terrain avoisinant ou par les fosses assurant un effet d'écran;

f) que, comme on le sait, le modelage des faisceaux des antennes de satellite contribue beaucoup à l'efficacité d'utilisation de la puissance disponible en radiofréquence, du spectre des fréquences et de l'orbite des satellites géostationnaires,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quels sont les effets de l'atmosphère et des méthodes de construction sur l'ouverture de faisceau et le gain réalisables avec une antenne;

2. quel est l'état de la technique en ce qui concerne la conception et la réalisation des antennes, notamment de celles qui ont des caractéristiques améliorées du point de vue des lobes latéraux et du rayonnement vers l'arrière;

3. quelles sont les caractéristiques de polarisation des antennes, notamment dans la région des lobes latéraux et dans les plans autres que les plans principaux;

4. à quelle précision de pointage peut-on raisonnablement s'attendre pour les divers types et les diverses dimensions d'antennes;

5. quelles sont les caractéristiques techniques nécessaires des systèmes d'antennes permettant d'utiliser simultanément les mêmes fréquences deux fois ou plus en un point donné;

6. comment peut-on mesurer ces diverses caractéristiques d'antenne;

7. quelles sont les caractéristiques du champ rayonné proche des antennes de station terrienne, notamment hors du faisceau principal et en présence d'accidents de terrain ou de fosses assurant un effet d'écran;

8. quelles sont les caractéristiques techniques des systèmes d'antenne de satellite fonctionnant avec modelage du faisceau soit le long de l'axe de la propagation soit perpendiculairement à cet axe?

Note. – Voir le Rapport 390.

PROGRAMME D'ÉTUDES 1A-1/4

DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE RÉFÉRENCE DES ANTENNES UTILISÉES DANS LES STATIONS TERRIENNES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1972-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les caractéristiques des lobes latéraux des antennes des stations terriennes influeront sur le niveau du brouillage entre les services fixes par satellite et les systèmes de Terre dans les bandes de fréquences utilisées en partage ainsi que sur l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires;

b) que la plupart des stations terriennes des services fixes par satellite actuellement en exploitation sont équipées d'antennes pour lesquelles le rapport diamètre/longueur d'onde (D/λ) est élevé et que l'on possède déjà des renseignements importants mais incomplets sur les diagrammes de rayonnement de ces antennes;

c) que les futures stations terriennes des systèmes du service fixe par satellite utiliseront peut-être des antennes ayant un rapport D/λ relativement faible,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination d'un diagramme de rayonnement de référence pour les études de coordination et pour le calcul du brouillage entre systèmes du service fixe par satellite ainsi qu'entre les stations terriennes de ces systèmes et les stations des autres services (Note 1);

2. détermination d'un objectif de construction pour les nouvelles antennes, avec des lobes latéraux aussi faibles que possible (Note 2).

Note 1. – Pour y parvenir d'une façon qui soit statistiquement significative et convaincante, il est nécessaire de recueillir un grand nombre de renseignements sur les lobes latéraux des antennes en champ lointain. Ces renseignements devraient porter sur une gamme représentative de types d'antennes, pour un large éventail de rapports D/λ et un large éventail de fréquences de fonctionnement. Il y aura lieu d'indiquer les conditions de mesure ainsi que l'incertitude sur les résultats de mesure.

Note 2. – L'un des principaux objectifs poursuivis étant d'améliorer l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, il est particulièrement important d'obtenir un affaiblissement efficace du rayonnement à quelques degrés en dehors du faisceau principal. L'objectif de réalisation devrait être fondé sur:

- l'analyse des résultats de mesure des valeurs de crête dans les lobes latéraux des antennes nouvelles et en projet pour les stations terriennes pour autant que ces antennes soient caractérisées par une réduction importante des lobes latéraux; ces mesures doivent être faites en champ lointain, à une hauteur suffisante par rapport au sol. Il y aura lieu d'indiquer l'incertitude qui entache les résultats de ces mesures;
- l'analyse des études déjà faites sur les nouveaux types d'antennes en projet, conçus pour assurer une réduction importante des lobes latéraux.

Note 3. – Voir les Avis 465, 580 et le Rapport 391.

PROGRAMME D'ÉTUDES 1B/4

CARACTÉRISTIQUES DE RAYONNEMENT DES ANTENNES DE SATELLITE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'efficacité d'utilisation du spectre des fréquences ainsi que de l'orbite des satellites géostationnaires dépend des qualités de fonctionnement des systèmes d'antenne;

b) qu'une réutilisation des fréquences exige des systèmes d'antenne capables d'utiliser simultanément les mêmes fréquences deux fois ou davantage en un même point ou dans la même zone de service;

c) que des antennes à faisceaux multiples peuvent être utilisées pour différentes zones de service, ce qui entraînera aussi une réutilisation des fréquences;

d) qu'une réutilisation des fréquences pourrait être réalisée avec des signaux à polarisations orthogonales;

e) qu'un modelage du faisceau est de nature à augmenter l'efficacité d'utilisation de la puissance du satellite;

f) qu'il convient d'évaluer, par des moyens pratiques, les caractéristiques de fonctionnement de ces systèmes d'antenne avant de procéder à leur mise en œuvre,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination du fonctionnement en polarisations orthogonales pour toutes les ouvertures angulaires, compte tenu notamment du type d'antenne;

2. détermination du couplage entre des antennes très voisines les unes des autres et entre les faisceaux des antennes à faisceaux multiples;

3. détermination des méthodes de modelage des faisceaux le long de l'axe de propagation et perpendiculairement à cet axe;

4. détermination de l'ouverture de faisceau minimale réalisable, compte tenu de facteurs tels que les dimensions et les tolérances géométriques réalisables en orbite pour les antennes ainsi que la précision de pointage des antennes de satellite;

5. détermination de l'ouverture de faisceau minimale utilisable, compte tenu des effets du milieu orbital ambiant, par exemple l'échauffement et les effets atmosphériques sur le trajet de propagation;

6. détermination des techniques à utiliser pour évaluer ces caractéristiques des antennes.

Note. – Voir les Rapports 555 et 558.

PROGRAMME D'ÉTUDES 1C-1/4

CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES DE STATION TERRIENNE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1974-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les champs rayonnés proches des antennes ont une influence sur le couplage entre les antennes de station terrienne du service fixe par satellite et les antennes situées au voisinage de celles-ci et fonctionnant dans les mêmes bandes de fréquences;

b) que les champs rayonnés par les antennes peuvent aussi être influencés par l'emploi de dépressions de terrain assurant un effet d'écran;

c) qu'on peut réaliser des antennes de station terrienne à plusieurs faisceaux et que l'emploi de ce type d'antennes peut être préférable à celui de plusieurs antennes à un seul faisceau;

d) que la réutilisation des fréquences pourrait être réalisée avec des signaux à polarisations orthogonales;

e) qu'il serait possible d'améliorer la précision du maintien en position et de la commande d'orientation des satellites en mettant en œuvre des techniques de régulation plus perfectionnées dans les sous-systèmes de satellite,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des relations existant entre les diagrammes du champ proche et du champ éloigné des stations terriennes du service fixe par satellite et d'autres stations utilisant les mêmes bandes de fréquences;

2. détermination du couplage entre antennes situées au voisinage les unes des autres;

3. détermination de l'efficacité de dépressions de terrain ou autres dispositifs de protection;

4. détermination des caractéristiques de rayonnement de chaque faisceau des antennes à plusieurs faisceaux;

5. détermination des restrictions imposées au nombre des faisceaux qui peuvent être produits par une seule antenne et de l'espacement angulaire minimal réalisable entre les faisceaux;

6. détermination des caractéristiques des systèmes d'antenne en matière de discrimination de polarisation, dans tous les secteurs angulaires, en tenant compte spécialement du type d'antenne;

7. détermination des limites souhaitables pour les possibilités d'orientation des antennes de station terrienne fonctionnant en liaison avec des satellites géostationnaires.

Note. – Voir les Rapports 555 et 709.

QUESTION 2-4/4

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1963-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'emploi de systèmes du service fixe par satellite susceptibles d'englober des liaisons de connexion vers les satellites d'autres services de radiocommunication constitue un moyen important des télécommunications, tant régionales que mondiales, des services fixe et mobile;

b) que les bandes de fréquences utilisées par ces systèmes devraient faire l'objet d'un accord international, non seulement afin de faciliter l'établissement de liaisons de télécommunication entre les stations terriennes situées dans divers pays, mais aussi afin d'éviter des brouillages avec d'autres systèmes de radiocommunication spatiale ou des systèmes de radiocommunication de Terre qui pourraient partager les mêmes bandes de fréquences;

c) que le choix des bandes de fréquences préférées pour ces systèmes dépend d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels les caractéristiques de la propagation, les niveaux de bruit radioélectrique, la possibilité de partager des fréquences avec des services de Terre, l'ouverture des faisceaux et les dimensions des antennes, les problèmes de repérage et de poursuite et les limitations imposées aux charges utiles;

d) que, les besoins en fréquences étant importants pour ces systèmes, on pourrait être amené à utiliser des bandes de fréquences autres que celles considérées comme optimales du point de vue technique;

e) que, d'ordinaire, dans une station terrienne ou spatiale, on a besoin d'au moins deux bandes de fréquences (une pour l'émission et une pour la réception) et que, dans une station spatiale, on peut avoir besoin de bandes de fréquences supplémentaires pour l'émission et la réception lorsque l'on fait usage de relais entre satellites;

f) que les possibilités de développement et d'application future de ces systèmes dépendront, dans une grande mesure, de la possibilité de partager des bandes de fréquences utilisées par des services de Terre, sans qu'il en résulte des brouillages mutuels;

g) que, pour des raisons liées aux brouillages mutuels, il ne sera peut-être pas possible de réaliser dans tous les cas le partage des bandes de fréquences entre ces systèmes et les services de Terre;

h) que l'efficacité de l'utilisation du spectre par de tels systèmes dépendra en partie des caractéristiques techniques utilisées, telles que les procédés de modulation, les paramètres de la modulation, les méthodes de réutilisation des fréquences ou la disposition des porteuses radioélectriques;

j) que l'établissement de ces systèmes nécessiterait un accord international sur les caractéristiques techniques à employer, notamment les caractéristiques de la bande de base, de la modulation et des fréquences radioélectriques;

k) que l'on peut s'attendre que le bruit admissible dans un système du service fixe par satellite dépende de la configuration du système et de certains facteurs de réalisation de celui-ci; qu'il peut y avoir intérêt, pour la conception des systèmes, à établir les spécifications de circuits fictifs de référence,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quels sont les types d'orbites et de caractéristiques préférés pour les systèmes du service fixe par satellite dans les applications suivantes:

1.1 services fixes de téléphonie multivoie, de télévision, de radiodiffusion sonore, de télégraphie et de transmission de données;

1.2 services mobiles assurant des communications télégraphiques ou téléphoniques et des transmissions de données entre des stations terriennes fixes et des stations spatiales desservant aussi des stations mobiles;

2. quels facteurs techniques faut-il prendre en considération pour le choix des bandes de fréquences à utiliser pour ces applications;

3. dans quelles conditions et dans quelle mesure les stations spatiales du service fixe par satellite, appartenant à un même système ou à des systèmes différents, peuvent-elles partager ces bandes de fréquences préférées;

4. dans quelles conditions et dans quelle mesure les systèmes du service fixe par satellite peuvent-ils partager ces bandes de fréquences préférées avec des services de Terre;

5. dans quelle mesure les systèmes du service fixe par satellite pourraient-ils utiliser des bandes de fréquences autres que celles considérées comme optimales, notamment les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz;

6. dans quelle mesure le choix des caractéristiques du système telles que les procédés de modulation, les méthodes de réutilisation des fréquences ou la disposition des canaux radioélectriques influerait-il sur l'efficacité de l'utilisation du spectre par les systèmes du service fixe par satellite pour les applications indiquées au § 1 ci-dessus;

7. quelles sont les caractéristiques préférées de bande de base et de modulation pour ces applications, y compris l'excursion de fréquence et la préaccentuation les plus appropriées aux satellites de radiodiffusion, compte tenu des contraintes imposées à l'exploitation sur la liaison descendante;

8. quels sont les circuits fictifs de référence appropriés à la conception des systèmes du service fixe par satellite, y compris les systèmes qui pourraient contenir des relais intersatellites?

Note. – Voir les Avis 352, 353, 354, 355, 358 et les Rapports 205, 206, 207, 208, 209, 386 et 393.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2A-4/4

POSSIBILITÉ DE PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES ENTRE LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET LES SERVICES DE RADIOCOMMUNICATION DE TERRE

(1965-1966-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'emploi des systèmes du service fixe par satellite susceptible d'englober des liaisons intersatellites et des liaisons de connexion vers les satellites d'autres services de radiocommunications entraînera une forte utilisation du spectre radioélectrique;

b) qu'il convient, en vue de l'utilisation rationnelle du spectre des fréquences, de partager le spectre entre les services de radiocommunication de Terre et les systèmes du service fixe par satellite;

c) qu'il convient d'étudier la possibilité de partager des bandes de fréquences avec les faisceaux hertziens;

d) qu'il convient en particulier d'étudier la possibilité de partage des bandes de fréquences entre les liaisons intersatellites du service fixe par satellite et les liaisons de radiocommunications de Terre;

e) que la Résolution N° 101 de la CAMR-79, invite le CCIR à étudier et à déterminer d'urgence les critères de partage appropiés à appliquer entre les services fixe et mobile et les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion;

f) que la Résolution N° 701 de la CAMR-79, invite le CCIR à étudier et à déterminer les critères applicables au partage entre les services fixe et mobile et les liaisons de connexion dans la bande 17,3-18,1 GHz, d'une largeur de bande égale à la largeur de bande totale attribuée aux satellites de radiodiffusion par satellite dans la Région 2.

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. critères affectant le choix de l'emplacement des stations terriennes d'un système du service fixe par satellite dans les diverses gammes du spectre des fréquences;

2. détermination des caractéristiques techniques préférées des antennes d'émission et de réception des stations terriennes situées en des emplacements donnés, du point de vue du partage des bandes avec d'autres services de radiocommunication;

3. critères affectant la détermination de la puissance maximale qui peut être rayonnée dans le plan horizontal par une station terrienne dans une largeur de bande de référence;

4. critères affectant le choix de l'angle de site minimal des antennes des stations terriennes;

5. mesure dans laquelle une modification physique des emplacements des stations terriennes permet de réaliser une protection électromagnétique entre ces stations et celles d'autres services de radiocommunication;

6. critères affectant le choix de la puissance des émetteurs des satellites dans les bandes de fréquences partagées avec d'autres services;

7. critères affectant le choix de la séparation géographique minimale réalisable entre les stations d'émission et de réception de faisceaux hertziens et les stations terriennes d'émission et de réception des systèmes du service fixe par satellite, quel que soit le type de modulation utilisé par l'un ou l'autre système;

8. critères affectant la puissance surfacique maximale admissible qui peut être produite à la surface de la Terre par les émissions des satellites du service fixe par satellite dans une largeur de bande de référence;

9. critères à considérer pour le partage des bandes de fréquences entre les liaisons intersatellites du service fixe par satellite et les liaisons de radiocommunications de Terre;

10. critères pour le partage des fréquences entre les services fixe et mobile et les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion.

Note. – Voir les Avis 356, 357, 359, 406, 558, et les Rapports 382, 385, 387, 388, 448, 449, 790, 791, 792, et 793.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2D-1/4

CARACTÉRISTIQUES DE MODULATION PRÉFÉRÉES ET DISPERSION DE L'ÉNERGIE DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1961-1963-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'emploi croissant de satellites de télécommunication entraînera de fortes demandes en fréquences du spectre;

b) que la mesure dans laquelle ces demandes pourront être satisfaites dépendra de l'efficacité de l'utilisation de la largeur de bande disponible pour la transmission de l'information et des possibilités pratiques de partage de cette largeur de bande entre différents systèmes du service fixe par satellite et du service fixe de Terre, compte tenu des facilités offertes par les méthodes de réutilisation des fréquences;

c) que l'efficacité de l'utilisation de la largeur de bande et les possibilités pratiques de mise en œuvre du partage des fréquences dépendent, entre autres choses, des méthodes et des paramètres de modulation;

d) que la détermination des possibilités pratiques de partage des fréquences, telles qu'elles sont décrites dans les Rapports 209 et 382, dépend de l'existence de rapports de protection acceptables entre les puissances du signal utile et du signal brouilleur à l'entrée du récepteur, pour des qualités de service spécifiées;

e) qu'on doit connaître le rapport signal utile/signal brouilleur pour chaque type de signal utile et chaque type de signal brouilleur, dans des conditions appropriées de modulation et d'évanouissement;

f) qu'au § 2.5 de la Recommandation 708 de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications, Genève, 1979, il est demandé au CCIR de continuer à étudier les critères de brouillages admissibles;

g) que les possibilités pratiques du partage des fréquences peuvent se trouver considérablement accrues si l'on veille à ce que l'énergie des systèmes qui utilisent des fréquences en partage soit dispersée uniformément dans toute la bande de fréquences occupée;

h) que l'emploi de la dispersion de l'énergie des signaux à modulation de fréquence et des signaux numériques permet de réduire à un minimum la densité de crête de l'énergie et de la rendre largement indépendante du contenu du signal de modulation;

j) que ces méthodes de dispersion de l'énergie devraient être conçues de manière à ne pas accroître excessivement le bruit total du système, la distorsion du signal et la complexité de réalisation et d'exploitation du système,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des caractéristiques de modulation préférées pour la transmission dans le sens Terre-espace et espace-Terre, dans le service fixe par satellite;

2. mesure dans laquelle on peut recourir à la compression des signaux ou à diverses méthodes de traitement des signaux, en vue d'utiliser la largeur de bande pour transmettre l'information avec le maximum d'efficacité, en tenant compte des possibilités offertes par les méthodes de réutilisation des fréquences et détermination des caractéristiques à employer de préférence lorqu'on a recours à ces méthodes;

3. détermination théorique et expérimentale des rapports signal utile/signal brouilleur nécessaires pour des qualités de service déterminées et pour divers types de signaux utiles et de signaux brouilleurs, dans des conditions appropriées de modulation et pour divers types d'évanouissements;

4. étude des méthodes d'émission, de réception et de modulation qui permettent de réduire à un minimum les rapports signal utile/signal brouilleur nécessaires pour une qualité de service déterminée;

5. évaluation théorique et expérimentale de la manière dont la densité spectrale d'énergie radioélectrique d'une transmission de téléphonie multivoie à modulation de fréquence, d'une transmission de télévision à modulation de fréquence et d'un système à modulation numérique peut être maintenue sensiblement constante et uniformément faible, quel que soit le contenu du signal de modulation; évaluation de la réduction de la densité maximale de puissance obtenue par l'emploi de cette technique.

Note. – Voir les Avis 446 et 464, et les Rapports 212, 384, 559 708 et 867.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2E-1/4

CARACTÉRISTIQUES D'ACCÈS MULTIPLE PRÉFÉRÉES DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1965-1966-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les satellites du service fixe par satellite correspondent simultanément avec de nombreuses stations terriennes situées en des endroits différents;

b) que certaines administrations envisagent d'utiliser, ou utilisent d'ores et déjà, diverses méthodes d'accès multiple, dont l'accès multiple par répartition dans le temps (méthode dite AMRT);

c) que, dans le souci d'utiliser avec efficacité les fréquences et les orbites, il peut y avoir intérêt à déterminer les caractéristiques optimales des méthodes d'accès multiple;

d) qu'il peut y avoir intérêt à recommander certaines caractéristiques des systèmes;

e) que les caractéristiques de transmission des systèmes d'accès multiple, et en particulier des systèmes à répartition dans le temps (AMRT), peuvent présenter de l'importance du point de vue de l'interaction de ces systèmes entre eux,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des méthodes d'accès multiple auxquelles il convient de donner la préférence, compte tenu en particulier de la nature du réseau, des méthodes de modulation et des différentes caractéristiques des systèmes utilisés dans le service fixe par satellite;

2. établissement de la liste des caractéristiques des systèmes d'accès multiple – et en particulier des systèmes AMRT – qu'il pourrait y avoir intérêt à recommander en tant que caractéristiques préférées et, s'il y a lieu, détermination de ces caractéristiques.

Note. – Voir le Rapport 708.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2H-3/4

UTILISATION DES BANDES DE FRÉQUENCES SITUÉES AU-DESSUS DE 10 GHz POUR LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1968-1970-1974-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il faut prévoir de larges bandes de fréquences pour les systèmes du service fixe par satellite, que ceux-ci soient de portée régionale ou mondiale;

b) qu'il convient d'examiner les possibilités d'utilisation, du point de vue technique, des bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz pour les systèmes du service fixe par satellite;

c) que l'utilisation des bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz, pour ces systèmes, posera des problèmes techniques de caractère particulier, par exemple l'influence des nuages et des précipitations sur les performances et la fiabilité des systèmes,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. problèmes techniques posés par l'utilisation des bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz pour les systèmes du service fixe par satellite;

2. techniques spéciales (par exemple techniques de diversité et de transmission adaptative * qui pourraient être mises en œuvre pour résoudre ces problèmes;

3. conditions dans lesquelles ces techniques pourraient convenir;

---

* On entend ici par transmission adaptative un mode de transmission dans lequel on fait varier le débit d'information ou la puissance rayonnée sur une liaison, pour compenser les variations de l'affaiblissement sur le trajet.

4. conditions dans lesquelles les systèmes du service fixe par satellite pourraient partager avec les services de Terre des bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz, et mesure dans laquelle ce partage pourrait être possible;

5. critères dont dépend la détermination de la zone de coordination des stations terriennes qui appliquent des techniques spéciales telles que la diversité d'emplacement et la régulation de la puissance d'émission.

Note. – Voir le Rapport 552.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2J-3/4

FACTEURS TECHNIQUES DONT DÉPEND L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DE L'ORBITE DES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES PAR DES RÉSEAUX A SATELLITE DE RADIOCOMMUNICATION PARTAGEANT DES BANDES DE FRÉQUENCES ATTRIBUÉES AU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1968-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, pour les réseaux à satellite de radiocommunication, l'orbite des satellites géostationnaires présente un intérêt certain;

b) que cette orbite ne peut contenir qu'un nombre limité de réseaux à satellite de radiocommunication utilisant la même bande de fréquences en partage, et que certains segments de cette orbite sont susceptibles de faire l'objet d'une très forte demande;

c) que les exigences imposées par les services ne sont pas uniformes et qu'elles peuvent entraîner des différences entre les caractéristiques des systèmes;

d) que l'espacement entre ces satellites est déterminé par la nécessité de réduire les brouillages et que, si les caractéristiques des satellites sont différentes, le nombre de ces satellites pouvant être placés sur un segment donné dépend également de la façon dont ils sont disposés;

e) que les brouillages peuvent se produire sur la liaison montante, sur la liaison descendante et sur les liaisons directes entre satellites et qu'ils dépendent d'un certain nombre de facteurs techniques;

f) que ces facteurs sont interdépendants et qu'il faut définir les relations qui existent entre eux pour pouvoir établir des critères appropriés permettant d'assurer une mise au point satisfaisante et une utilisation aussi rationnelle que possible de l'orbite des satellites géostationnaires;

g) qu'il sera possible de rendre l'utilisation de cette orbite d'autant plus rationnelle que l'on pourra utiliser plusieurs fois les mêmes fréquences dans un satellite de radiocommunication donné;

h) que l'efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences peut également être améliorée si l'on jumelle systématiquement les bandes de fréquences des liaisons montante et descendante des réseaux à satellite;

j) que la Résolution N° 3 de la CAMR-79 invite le CCIR à fournir des renseignements techniques concernant les principes, les critères et les paramètres techniques, y compris ceux dont on a besoin pour la planification des services spatiaux;

k) que la Recommandation N° 708 de la CAMR-79 recommande au CCIR d'étudier ou, selon le cas, de continuer à étudier les questions incluses dans ce Programme d'études,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. caractéristiques techniques des systèmes de radiocommunication par satellite utilisant des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite, qui influent sur l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires, et relation qui existe entre ces caractéristiques, notamment:

1.1 détermination des caractéristiques techniques préférées des antennes d'émission et de réception des stations terriennes et spatiales, y compris la pureté de polarisation (circulaire ou rectiligne) que l'on peut obtenir dans toutes les parties pertinentes des diagrammes de rayonnement et orientation des plans de polarisation dans le cas de la polarisation rectiligne, du point de vue du partage des fréquences à l'intérieur du même réseau à satellite et avec d'autres réseaux;

1.2 détermination de la gamme optimale de puissance des émetteurs installés à bord des satellites et dans les stations terriennes susceptibles de faciliter le partage des fréquences entre les réseaux par satellite;

1.3 détermination des effets qu'exercent la bande de base et les caractéristiques de modulation sur le partage des fréquences entre les réseaux;

1.4 mesure dans laquelle il est possible et utile de réduire les erreurs du maintien en position des satellites et de la direction de pointage de leurs faisceaux d'antenne;

1.5 moyens techniques permettant de porter à un maximum la longueur de l'arc de service d'un satellite;

2. critères techniques à appliquer pour garantir une mise au point satisfaisante, conduisant à l'utilisation la plus efficace et la plus rationnelle de l'orbite des satellites géostationnaires;

3. mesure dans laquelle il pourrait se révéler possible et souhaitable d'adopter des caractéristiques techniques préférées pour des satellites de radiocommunication géostationnaires différents et des stations terriennes différentes, afin de rendre plus rationnelle l'utilisation de cette orbite;

4. caractéristiques techniques et principes d'utilisation qu'il convient de recommander pour les appliquer à des satellites géostationnaires considérés isolément, fournissant pour les liaisons montante et descendante plus d'une paire de fréquences (y compris le cas de satellites utilisés pour des services multiples), afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires;

5. mesure dans laquelle il pourrait se révéler souhaitable de jumeler les bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite pour les liaisons montante et descendante et, s'il y a lieu, de recommander les jumelages préférés, afin d'améliorer l'efficacité globale de l'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires. Il conviendra de tenir compte, dans cette étude, des diverses applications et des différentes attributions de fréquences dans les trois Régions de l'UIT;

6. manières dont il sera possible d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et du spectre des fréquences, en admettant que le bruit total dû aux brouillages en provenance d'autres réseaux à satellite dépasse nettement les valeurs recommandées dans l'Avis 466. Pour cette étude, on tiendra compte de l'éventualité que cette contribution totale plus élevée de bruit dû aux brouillages pourrait, le cas échéant, être limitée aux réseaux utilisant des satellites placés dans des portions encombrées de l'orbite; l'étude devrait aussi porter sur les deux points suivants: possibilité de résoudre les problèmes de brouillage résultant des caractéristiques de réseaux non homogènes, répercussions du brouillage externe sur des réseaux à satellite fonctionnant avec réutilisation des fréquences;

7. facteurs dont dépend l'utilisation multiple des mêmes fréquences dans un satellite de radiocommunication;

8. critères de partage qui permettront d'exploiter des réseaux avec satellites géostationnaires et non géostationnaires, sans brouillage inacceptable.

Note. – Voir les Avis 466, 483, 484, 523 et 524, et les Rapports 388, 453, 454, 455, 556, 557, 558, 559, 710, 711, 866, 871 et 875.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2K-3/4 *

LIAISONS DE CONNEXION POUR LES STATIONS SPATIALES DU SERVICE DE RADIODIFFUSION PAR SATELLITE

(1972-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'aux termes du Règlement des radiocommunications les liaisons Terre vers espace utilisées comme liaison de connexion aux satellites du service de radiodiffusion appartiennent au service fixe par satellite;

b) que la fréquence et les caractéristiques techniques de ces liaisons de connexion peuvent dépendre des caractéristiques techniques du satellite de radiodiffusion mais qu'il convient aussi de tenir compte des risques de brouillage avec les satellites du service fixe assurant des liaisons entre points déterminés de la Terre;

c) que certaines bandes de fréquences sont attribuées au service fixe par satellite à la fois dans le sens Terre vers espace et dans le sens espace vers Terre;

d) que les contraintes des systèmes du service de radiodiffusion par satellite peuvent influer sur l'efficacité d'utilisation des bandes de fréquences du service fixe par satellite pour les liaisons entre stations fixes;

e) que l'emploi des bandes de fréquences 10,7-11,7 GHz (Terre vers espace, Région 1), 14,5-14,8 GHz (Terre vers espace, toutes les Régions à l'exception de l'Europe sauf Malte) et 17,3-18,1 GHz (Terre vers espace, toutes les Régions) est limité aux liaisons de connexion pour le service de radiodiffusion par satellite;

---

* Ce programme d'études doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 8, 9, 10 et 11, et les résultats des travaux pertinents doivent être communiqués à ces Commissions d'études.

f) que les bandes de fréquences Terre vers espace 10,7-11,7 GHz et 17,7-18,1 GHz destinées aux liaisons de connexion nécessaires au service de radiodiffusion par satellite sont partagées avec les services fixe, mobile et fixe par satellite (espace vers Terre);

g) que la construction de grandes stations spatiales avec intégration de multiples services peut ouvrir d'intéressantes perspectives pour utiliser avec efficacité la partie du spectre attribuée aux services spatiaux;

h) que, par ses Résolutions N^os^ 3, 101 et 701, la CAMR-79 demande que cette question fasse l'objet d'un complément d'étude;

j) que, par sa Recommandation N° 101, la CAMR-79 demande expressément que la question soit étudiée,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination de la mesure dans laquelle des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite (Terre vers espace), autres que les bandes mentionnées au point *e)* ci-dessus, pourraient convenir pour les liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion.

2. détermination des caractéristiques techniques, par exemple excursion de fréquence et préaccentuation, et des principes d'utilisation à recommander pour la mise en œuvre de telles liaisons de connexion, compte tenu des exigences particulières du service de radiodiffusion par satellite;

3. détermination de la mesure dans laquelle des liaisons de connexion aux satellites de radiodiffusion pourraient partager une bande de fréquences avec d'autres liaisons Terre vers espace ou espace vers Terre du service fixe par satellite, ou avec des services de Terre, ou les deux, compte tenu des exigences et des contraintes imposées aux deux types de systèmes, et détermination des conditions et des critères d'un tel partage;

4. détermination des caractéristiques et des autres aspects des liaisons de connexion qui faciliteraient la coexistence ou l'intégration de sous-systèmes de radiodiffusion par satellite avec des sous-systèmes d'autres services spatiaux, en particulier le service fixe par satellite, à bord de la même station spatiale.

Note 1. – On considérera que les éléments pertinents des Résolutions N^os^ 3, 101 et 701 ainsi que de la Recommandation N° 101 de la CAMR-79, entrent dans le cadre du présent Programme d'études, et qu'il devrait en être de même des dispositions de la Recommandation N° 64 de la CAMR-79.

Note 2. – Voir les Rapports 453, 561, 712 et 952.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2L-1/4

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE, D'UNE PART, LE SERVICE DE RADIONAVIGATION ET LE SERVICE DE RADIONAVIGATION PAR SATELLITE ET, D'AUTRE PART, LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE FONCTIONNANT AUX FRÉQUENCES DE L'ORDRE DE 14 GHz

(1972-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) le § 2.7 de la Recommandation N° 708 de la CAMR-79 relatif au partage de fréquences entre réseaux à satellites non géostationnaires et réseaux à satellites géostationnaires;

b) le § 2.14 de la Recommandation N° 708 de la CAMR-79 relatif au partage de fréquences entre le service de radionavigation et le service fixe par satellite (Terre vers espace) dans la bande de fréquences 14-14,3 GHz;

c) la disposition de la Recommandation N° 61 de la CAMR-79 invitant le CCIR à poursuivre l'étude des normes techniques pour l'évaluation du brouillage préjudiciable et à recommander des critères techniques pour les bandes de fréquences supérieures à 28 MHz attribuées aux services de radiocommunications spatiales, à la radioastronomie et aux services de radiocommunication de Terre intéressés, afin de permettre à l'IFRB et aux administrations d'appliquer les critères ainsi définis pour ces bandes,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. critères de partage des fréquences entre le service de radionavigation et le service fixe par satellite (Terre vers espace) dans la bande de fréquences de 14,0-14,3 GHz;

2. critères de protection du service fixe par satellite (Terre vers espace) contre les brouillages causés par des systèmes du service de radionavigation par satellite dans la bande de fréquences de 14,3-14,4 GHz.

Note 1. – Sujet également traité par la Commission d'études 8 (au titre du Programme d'études 17D/8 (Kyoto,1978)).

Note 2. – Voir le Rapport 560.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2M-1/4 *

CARACTÉRISTIQUES DES LIAISONS DE CONNEXION DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISÉES POUR LA CONNEXION DES SATELLITES DE DIVERS SERVICES MOBILES PAR SATELLITE

(1974-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'aux termes du Règlement des radiocommunications les trajets Terre vers espace et espace vers Terre utilisés pour les connexions entre des stations terriennes fixes et un satellite d'un service mobile par satellite peuvent appartenir au service fixe par satellite (numéro 22 du Règlement des radiocommunications):

b) que l'étroitesse des bandes de fréquences attribuées au services mobiles par satellite rend très probable l'utilisation de bandes de fréquences du service fixe par satellite pour ces liaisons de connexion;

c) que les fréquences et les caractéristiques techniques de ces liaisons de connexion peuvent dépendre des caractéristiques techniques des réseaux des différents services mobiles par satellite, mais qu'elles doivent aussi tenir compte des risques de brouillage avec les satellites du service fixe assurant des liaisons entre points déterminés de la Terre;

d) que les contraintes imposées à tel ou tel service mobile par satellite peuvent influer sur l'efficacité avec laquelle les bandes de fréquences du service fixe par satellite sont utilisées pour les communications entre stations fixes;

e) que la construction de grandes stations spatiales avec intégration de multiples services peut offrir une option intéressante pour l'utilisation efficace de la partie du spectre attribuée aux services spatiaux,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. lesquelles des bandes de fréquences ** attribuées au service fixe par satellite seraient appropriées sur le plan technique pour les liaisons de connexion avec les satellites des services mobiles par satellite et, s'il y a lieu, quelles fréquences pourrait-on envisager pour cet usage;

2. caractéristiques techniques et principes d'utilisation pour l'emploi de ces liaisons, compte tenu des exigences particulières des services mobiles par satellite;

3. mesure dans laquelle les liaisons de connexion des satellites d'un ou de plusieurs services mobiles par satellite peuvent partager une bande de fréquences avec d'autres liaisons du service fixe par satellite, compte tenu des exigences et des contraintes imposées aux deux types de systèmes, et des conditions de ce partage;

4. Caractéristiques techniques et autres aspects des liaisons de connexion qui faciliteraient l'intégration des systèmes de communication de divers services mobiles par satellite avec d'autre services spatiaux, en particulier avec le service fixe par satellite, à bord de la même station spatiale.

Note. – Voir le Rapport 561.

---

* Ce Programme d'études doit être porté à l'attention de la Commission d'études 8.

** Ces études ne sont pas nécessaires dans le cas où une bande de fréquences du service fixe par satellite est attribuée en même temps à un service mobile par satellite.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2N-1/4

CARACTÉRISTIQUES DES JONCTIONS POUR LIAISONS DE TRANSMISSION NUMÉRIQUES INTERNATIONALES DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1976-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le CCITT propose une ligne de démarcation entre les travaux poursuivis par la Commission d'études XVIII du CCITT et ceux de la Commission d'études 4 du CCIR relatifs aux liaisons numériques internationales entre deux pays utilisant des multiplex primaires différents;

b) que la technique de concentration numérique des conversations (CNC) est une technique propre à la transmission numérique par satellite (AMRT, par exemple) et qu'elle n'a pas été étudiée par le CCITT dans le cadre de ses travaux sur les liaisons numériques internationales;

c) que le CCITT a fixé une série de caractéristiques de jonction pour les systèmes multiplex du premier ordre et d'ordre supérieur (Avis G.732, G.733, G.742, G.743, G.751 et G.752);

d) que les liaisons numériques par satellite devraient faire partie du réseau numérique international plésiochrone recommandé;

e) que, pour un satellite quasi géostationnaire, le temps de transmission d'une extrémité à l'autre du circuit fictif de référence peut varier de façon significative pendant un intervalle quelconque de 12 à 24 heures, ou sur des durées plus longues, du fait du mouvement relatif du satellite par rapport à la Terre;

f) que des liaisons par satellite peuvent être nécessaires à la transmission de signaux de télévision numérique,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

lorsqu'il existe une liaison numérique terrestre entre station terrienne et centre de transit:

1. détermination de la meilleure manière d'appliquer la technique CNC avec une jonction numérique directe;

2. détermination du point où la jonction doit être prévue, compte tenu des divers types de transmission possibles (AMRT, AMRT-CNC, une seule voie par porteuse/MDP, MRT-MDP-AMRF et télévision numérique MDP);

3. détermination des types de signaux multiplex d'ordre supérieur à transmettre sur les liaisons par satellite en plus des signaux multiplex du premier ordre;

4. détermination des critères de qualité et de disponibilité (par exemple, gigue de phase, glissements, erreurs numériques groupées) aux jonctions pertinentes et des méthodes de codage et de décodage à appliquer pour la correction d'erreur (le cas échéant) pour satisfaire les critères de qualité propres aux transmissions de données;

5. détermination de la nécessité et du type de méthode d'embrouillage à appliquer éventuellement pour assurer la transparence et permettre la dispersion de l'énergie;

6. détermination de la nécessité d'un codage et d'un décodage, ainsi que d'un multiplexage et d'un démultiplexage et, s'il y a lieu, des méthodes à appliquer;

7. détermination de la nécessité d'utiliser des techniques de justification et, s'il y a lieu, détermination des paramètres pertinents (par exemple, combien d'éléments numériques de service sont-ils nécessaires pour la justification?);

8. détermination de la nécessité d'une mémoire-tampon régulatrice pour compenser les variations de temps de propagation dues au mouvement du satellite et de la possibilité de la combiner avec la mémoire-tampon AMRT;

9. détermination du type de structure de trame approprié pour l'équipement de jonction numérique direct qui pourrait convenir aux multiplex MIC du premier ordre ou d'ordre supérieur;

10. détermination des caractéristiques optimales des jonctions pour la transmission de signaux de télévision numérique.

Note. – Voir les Avis 521 et 522, le Rapport 707, et le Vœu 56.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2P-1/4

CARACTÉRISTIQUES DE SYSTÈME DU SERVICE INTER-SATELLITES UNTILISÉ PAR LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET PROBLÈMES DE PARTAGE AVEC D'AUTRES SERVICES SPATIAUX

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des liaisons du service inter-satellites (liaisons inter-satellites) peuvent faire l'object d'une utilisation très étendue par le service fixe par satellite;

b) que l'utilisation des liaisons inter-satellites peut faciliter et améliorer l'interconnexion des stations terriennes du service fixe par satellite, en particulier lorsqu'il est difficile ou impossible d'assurer une visibilité directe entre ces stations et un même satellite situé sur l'orbite des satellites géostationnaires;

c) que les brouillages jouent un rôle important, notamment en ce qui concerne l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et le partage des bandes de fréquences avec les systèmes de Terre;

d) que les tolérances applicables au maintien en position et en orientation des satellites et les caractéristiques des diagrammes d'antennes pour les liaisons inter-satellites ont des répercussions sur le niveau des brouillages entre les liaisons inter-satellites des différents réseaux à satellite du service fixe par satellite qui utilisent les mêmes fréquences;

e) que la CAMR-79 a fait de nouvelles attributions au service inter-satellites, dans des bandes de fréquences utilisées en partage avec d'autres services;

f) que certaines dispositions des Résolutions N° 3 et N° 703 et des Recommandations N° 64 et N° 61 de la CAMR-79 pourraient être prises en considération pour étudier les caractéristiques techniques des liaisons inter-satellites et les problèmes de partage posés par ces liaisons,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. buts et conditions dans lesquels il est nécessaire ou souhaitable de recourir à des liaisons inter-satellites;

2. fréquences à préférer du point de vue technique, pour les liaisons inter-satellites;

3. modification éventuelle à apporter aux critères de qualité des circuits spécifiés dans les Avis 353 et 354 pour tenir compte de l'utilisation possible de liaisons inter-satellites;

4. détermination des effets exercés sur les caractéristiques des systèmes de transmission, par le temps de propagation et les variations de temps de propagation supplémentaires qu'introduit une liaison inter-satellites;

5. objectifs qu'il convient d'appliquer, en matière de disponibilité des circuits, aux systèmes de transmission qui comprennent une liaison inter-satellites;

6. critères qui influent sur la réutilisation des fréquences et le brouillage entre les réseaux à satellites utilisant des liaisons inter-satellites qui fonctionnent aux mêmes fréquences;

7. mesure dans laquelle la présence d'une liaison inter-satellites influe sur les caractéristiques des liaisons associées espace-Terre et Terre-espace et, en conséquence, manière dont elle influence les critères de partage entre les systèmes de Terre et les autres systèmes à satellite;

8. méthode de modulation optimale, y compris la régénération ou un autre traitement éventuel des signaux, dans les satellites des systèmes utilisant des liaisons inter-satellites;

9. détermination des critères pour le partage entre le service inter-satellites et d'autres services spatiaux;

10. modalités selon lesquelles il convient de tenir compte des liaisons inter-satellites pour évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires.

Note. – Voir le Rapports 451, 874 et 951.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2Q/4 *

INTÉGRATION DES SYSTÈMES A SATELLITES DANS LES RÉSEAUX POUR TRANSMISSION DE DONNÉES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les liaisons numériques par satellite devraient faire partie du réseau numérique international plésiochrone recommandé par le CCITT;

b) que le temps de transmission d'une extrémité à l'autre de la liaison peut avoir une influence considérable sur les caractéristiques de transmission d'un réseau pour données lorsqu'on n'a pas choisi de techniques appropriées de correction d'erreur;

c) que les caractéristiques particulières des systèmes à satellites doivent être prises en considération dans la conception des nouveaux réseaux internationaux pour données,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des caractéristiques des systèmes à satellites qui peuvent avoir une grande importance pour la transmission de données, et étude des ressemblances et des différences entre les réseaux de Terre;

2. influence des nouveaux facteurs introduits par les systèmes à satellites, notamment le temps de propagation, sur les réseaux ou les services actuels de transmission de données;

3. solutions que l'on peut adopter pour pallier les inconvénients éventuels de l'introduction des systèmes à satellites dans les services de transmission de données existants;

4. systèmes de correction d'erreur convenant le mieux à la transmission de données par satellite (la coordination avec la Question 7/XVII de la Commission d'études XVII du CCITT est nécessaire);

5. avantages et inconvénients des systèmes à satellites pour l'interconnexion avec les réseaux nationaux pour données;

6. modalités d'intégration des systèmes à satellites dans les réseaux internationaux pour données;

7. services à grand débit binaire que l'on peut assurer par satellite et comparaison avec les possibilités des réseaux de Terre;

8. influence des caractéristiques des satellites à destination multiple et à accès multiple sur la topologie des réseaux pour données.

Note. – Voir le Rapport 708 et l'Avis 521.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2R/4

MÉTHODES DE COORDINATION TECHNIQUE DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le développement des systèmes de télécommunication par satellite rencontre des difficultés du fait que de nouveaux satellites sont placés dans certaines portions de l'orbite des satellites géostationnaires et que la probabilité de brouillage mutuel s'en trouve accrue;

b) que le Règlement des radiocommunications ne prévoit aucune procédure technique pour la coordination des systèmes de télécommunication par satellite;

---

* Les études effectuées au titre du présent Programme d'études nécessitent la coordination avec les travaux des Commissions d'études VII et XVII du CCITT.

c) que l'on étudie actuellement de nombreuses méthodes, sur le plan technique et sur celui de l'organisation, pour accroître l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires;

d) qu'il n'existe pas de procédures normalisées pour la coordination technique des systèmes de télécommunication par satellite;

e) que la CAMR-79 a adopté la Résolution N° 3 «relative à l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires et à la planification des services spatiaux utilisant cette orbite»,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. méthodes pour la coordination technique des systèmes de télécommunication par satellite appliquant des combinaisons différentes pour l'accès multiple et la modulation;

2. mise au point de procédures pour la coordination technique des systèmes de télécommunication par satellite.

Note. – Voir le Rapport 870.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2S/4 *

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LES LIAISONS DE SATELLITE A SATELLITE DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET LES SERVICES DE RADIOCOMMUNICATION DE TERRE

(Question 2/4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que certaines bandes de fréquence sont attribuées en partage au service inter-satellites et à certains services de radiocommunication de Terre;

b) que la CAMR-79 a invité le CCIR dans la Recommandation N° 710 à étudier les critères de partage applicables au partage entre le service de radiolocalisation et le service inter-satellites dans les bandes 59-64 GHz et 126-134 GHz dans lesquels les radiodétecteurs aéroportés du service de radiolocalisation peuvent fonctionner sous réserve de ne pas causer de brouillage préjudiciable au service inter-satellites;

c) que la CAMR-79 a invité le CCIR dans la Recommandation N° 709 à étudier les critères de partage applicables au partage entre le service mobile aéronautique et le service inter-satellites dans les bandes 54,25-58,2 GHz, 59-64 GHz, 116-134 GHz, 170-182 GHz et 185-190 GHz dans lesquels les stations du service mobile aéronautique peuvent fonctionner sous réserve de ne pas causer de brouillage préjudiciable au service inter-satellites;

d) que la CAMR-79 a invité le CCIR dans la Recommandation N° 707 à étudier les critères de partage applicables au partage entre le service de radionavigation et le service inter-satellites dans la bande 32-33 GHz,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. critères de partage des fréquences entre le service de radiolocalisation et le service inter-satellites (liaisons du service fixe par satellite) dans les bandes 59-64 GHz et 126-134 GHz ;

2. critères de partage des fréquences entre le service mobile aéronautique et le service inter-satellites (liaisons du service fixe par satellite) dans les bandes 54,25-58,2 GHz, 59-64 GHz, 116-134 GHz, 170-182 GHz et 185-190 GHz;

3. critères de partage des fréquences entre le service de radionavigation et le service inter-satellites (liaisons du service fixe par satellite) dans la bande 32-33 GHz.

Note. – Voir le Rapport 872.

---

* Ce Programme d'études doit être porté à l'attention des Commissions d'études 2 et 8.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2T/4 *

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET LE SERVICE DE RADIODIFFUSION PAR SATELLITE

(Question 2/4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la CAMR-79 a attribué des bandes de fréquences communes au service fixe par satellite et au service de radiodiffusion par satellite;

b) que certaines de ces attributions concernent des Régions différentes, mais que l'orbite des satellites géostationnaires est une ressource commune dont toutes les Régions doivent bénéficier;

c) que les caractéristiques techniques des réseaux des deux services considérés peuvent être fort différentes, notamment pour ce qui est des p.i.r.e. des station spatiales;

d) que, d'après les Résolutions N° 700 et N° 34 de la CAMR-79, le CCIR doit étudier d'urgence les aspects particuliers du partage des bandes entre le service fixe par satellite et le service de radiodiffusion par satellite;

e) que, d'après la Recommandation N° 708 de la CAMR-79, le CCIR doit étudier ou, selon le cas, continuer à étudier les conditions de partage des fréquences dans les bandes attribuées par ladite conférence au service de radiodiffusion par satellite,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. critères qui influent sur le partage des fréquences et sur les brouillages entre systèmes du service fixe par satellite et du service de radiodiffusion par satellite;

2. caractéristiques techniques et d'exploitation des systèmes du service fixe par satellite susceptibles de faciliter le partage entre les deux services;

3. facteurs techniques et d'exploitation se rapportant spécifiquement à la question du partage des fréquences entre les deux services, lorsqu'ils desservent des Régions différentes.

Note. — Voir aussi les Rapports 809 et 875.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2U/4

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE, D'UNE PART, LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE ET, D'AUTRE PART, LE SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (DÉTECTEURS PASSIFS) ET LE SERVICE DE RECHERCHE SPATIALE (DÉTECTEURS PASSIFS)

(Question 2/4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les attributions aux services d'exploration de la Terre par satellite et de recherche spatiale pour le fonctionnement des détecteurs passifs à bord d'engins spatiaux ont été faites dans diverses bandes de fréquences;

b) que les attributions faites dans la bande 18,6-18,8 GHz le sont en partage avec les services fixe, mobile (sauf mobile aéronautique) et fixe par satellite;

c) que l'application des critères de partage contenus dans le Rapport 694 pourrait limiter le développment des services fixe, mobile (sauf mobile aéronautique) et fixe par satellite,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. faire réexaminer le contenu du Rapport 694 par toutes les Commissions d'études concernées (notamment les Commissions d'études 4 et 9);

2. étudier les restrictions minimales qui pourraient être appliquées au service fixe par satellite (espace vers Terre) pour assurer un fonctionnement satisfaisant des détecteurs passifs;

---

* Ce Programme d'études doit être porté à l'attention des Commissions d'études 10 et 11.

3. étudier les restrictions maximales que peut tolérer le service fixe par satellite, sans que son fonctionnement soit compromis.

Note. – Le partage des fréquences entre le service fixe (systèmes de faisceaux hertziens) et les service d'exploration de la Terre par satellite et de recherche spatiale fait l'objet du Programme d'études 17D/9. Les conditions requises des détecteurs passifs dans la bande de fréquences 18,6-18,8 GHz sont traitées dans la Note du § 8 de l'Avis 595, relatif au service fixe (systèmes de faisceaux hertziens numériques) qui fonctionne dans la bande 17,7-19,7 GHz.

PROGRAMME D'ÉTUDES 2V/4

CRITÈRES DE BROUILLAGE ET MÉTHODES DE CALCUL APPLICABLES AUX RÉSEAUX DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE UTILISANT LA MODULATION NUMÉRIQUE

(Question 4)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, pour le partage des bandes de fréquences entre le service fixe par satellite et d'autres services spatiaux, il faut disposer de critères de brouillage appropriés;

b) que, pour assurer la coordination des réseaux à l'intérieur du service fixe par satellite, il faut disposer de critères de brouillage appropriés;

c) que, pour calculer le brouillage, il faut déterminer les niveaux des signaux brouilleurs avant démodulation;

d) que l'effet total du brouillage peut être une fonction complexe des caractéristiques et des niveaux de puissance des signaux brouilleurs avant démodulation, des caractéristiques du démodulateur et de la qualité de fonctionnement en l'absence de brouillage;

e) que les critères de l'Avis 523 sont provisoires et qu'ils concernent la protection d'un système numérique spécifique (Téléphonie MIC à 8 bits);

f) qu'il est souhaitable que les textes du CCIR décrivent des procédures simples pour la conversion du brouillage ou des critères de brouillage en niveau de signaux brouilleurs,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. déterminer des méthodes permettant de convertir les niveaux de prémodulation des signaux brouilleurs en effets de brouillage ou en critères de brouillage, compte tenu du fait que le brouillage total dépend des caractéristiques et du nombre des signaux brouilleurs ainsi que de la largeur de bande dans laquelle ils sont mesurés, et que les critères de brouillage sont généralement spécifiés pour divers pourcentages de temps;

2. déterminer des méthodes permettant d'évaluer les effets d'une seule source de brouillage, afin d'établir et d'appliquer des critères appropriés relatifs à une source unique de brouillage;

3. déterminer des méthodes permettant de caractériser les perturbations de prémodulation autres que le bruit thermique (par exemple, brouillage entre symboles, non-linéarités) qui peuvent affecter la conversion des niveaux des signaux brouilleurs en effets de brouillage après démodulation.

QUESTION 7-1/4

VARIATIONS DE LA TRANSMISSION DANS LA BANDE DE BASE, TEMPS DE PROPAGATION, ÉCHOS ET DISCONTINUITÉS DUS A DES COMMUTATIONS DANS LES SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1962-1963-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des satellites évoluant à diverses altitudes peuvent être utilisés pour les télécommunications;

b) que, étant donné les distances parcourues par les signaux et la vitesse finie des ondes radioélectriques, l'emploi de satellites de la Terre pour les télécommunications introduit un temps de propagation;

c) que des échos dus, par exemple, à des défauts d'adaptation d'impédance dans les termineurs 4 fils/2 fils extérieurs à la liaison par satellite peuvent également se présenter;

d) que les discontinuités de temps imputables à la commutation des signaux entre satellites, dans le cas de systèmes à satellites non synchrones, peuvent provoquer des difficultés dans la transmission de signaux de téléphonie, de télégraphie, de télévision ou autres, si elles sont excessives ou trop fréquentes;

e) que les temps de propagation admissibles, les niveaux des échos et les discontinuités de commutation, les variations d'affaiblissement et variations de fréquence dues à l'effet Doppler et à d'autres causes sont des points pour lesquels il incombe au CCITT (à la CMTT, dans le cas de la télévision) de prendre des décisions;

f) que les valeurs admissibles du temps de propagation peuvent avoir un effet prononcé sur les prix d'installation et de maintenance des systèmes du service fixe par satellite;

g) que, malgré l'augmentation de couverture obtenue avec moins de satellites lorsque ceux-ci sont à une altitude élevée, le temps de propagation sera plus grand que si l'on utilise des satellites à basse altitude,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. à quel temps de propagation et à quelles discontinuités dues à des commutations peut-on s'attendre pour les différents types de systèmes du service fixe par satellite;

2. quelles méthodes pourrait-on utiliser, à l'intérieur même du système par satellite, pour réduire ou pour éviter les variations du temps de propagation et les discontinuités dues aux commutations dans le cas des systèmes à satellites non synchrones;

3. quelles sont les variations d'affaiblissement et les variations de fréquence résiduelles susceptibles de se produire dans la bande de base des divers types de systèmes du service fixe par satellite;

4. quelles sont les orbites les mieux adaptées aux systèmes du service fixe par satellite en ce qui concerne les valeurs admissibles maximales du temps de propagation, du niveau des signaux d'échos et des discontinuités dues à la commutation pour des signaux de téléphonie, de télégraphie, de télévision et autres, en tenant compte, suivant le cas, des points de vue du CCITT et de la CMTT?

Note. – Voir les Rapports 214 et 383.

QUESTION 13-1/4

FACTEURS QUI CONTRIBUENT A LA TEMPÉRATURE DE BRUIT D'UNE ANTENNE DE RÉCEPTION DE STATION TERRIENNE

(1965-1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que certains facteurs d'ordre atmosphérique tels que la teneur en vapeur d'eau, les nuages et les précipitations contribuent à la température de bruit d'une antenne de réception de station terrienne;

b) que l'emploi d'un radome peut introduire d'autres facteurs qui contribuent à cette température de bruit;

c) que l'on peut isoler et étudier l'effet de ces facteurs lorsqu'on tient dûment compte de toutes les causes telles que: bruit solaire et bruit cosmique, sol et autres particularités du milieu qui entoure l'antenne, bruits industriels et signaux non désirés, bruit thermique engendré par le système de réception ou par le système de mesure du bruit et renvoyé aux bornes de l'antenne;

d) que tous les facteurs contributifs mentionnés dépendent de la fréquence et de l'angle de site,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les contributions à la température de bruit d'une antenne de réception type pour station terrienne, avec ou sans radome, introduites par:

1.1 la vapeur d'eau atmosphérique,

1.2 les nuages,

1.3 les précipitations,

1.4 les constituants de l'atmosphère autres que la vapeur d'eau,

1.5 la Terre,

1.6 le bruit solaire et le bruit cosmique;

2. comment ces facteurs varient-ils en fonction de l'heure du jour et de la saison;

3. comment varient-ils en fonction du diagramme de directivité de l'antenne et selon la direction, en particulier selon l'angle de site;

4. comment peut-on exprimer statistiquement les variations de la température de bruit qui sont imputables à des facteurs météorologiques;

5. en quoi un radome contribue-t-il à la température de bruit, notamment selon qu'il est sec ou mouillé, compte tenu à la fois de ses propriétés d'absorption et de diffusion, et des possibilités de dépôt de glace, avec ou sans autres substances;

6. comment pense-t-on que ces facteurs varient en fonction de la fréquence?

Note. – Voir les Rapports 390 et 868.

QUESTION 20-1/4

EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES STATIONS TERRIENNES

(1970-1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les rapides progrès des télécommunications internationales par satellite ont suscité la construction de stations terriennes dans plusieurs pays;

b) qu'il serait utile d'inviter les organisations internationales, les exploitations privées reconnues et les organismes scientifiques et industriels s'occupant des télécommunications par satellite de faire part de leur expérience dans le cadre des études à effectuer;

c) que le travail réalisé à ce jour par les divers cycles d'études internationaux constitue, sans nul doute, la contribution initiale la plus intéressante à prendre en considération;

d) qu'une étude comparative des méthodes de mesure et de gestion à distance est souhaitable, en particulier pour faciliter la mise en œuvre de systèmes automatiques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les méthodes d'essai appropriées pour l'exploitation et pour la maintenance d'une station terrienne;

2. quels sont les types d'équipement d'essai indispensables pour appliquer ces méthodes;

3. quelles pourraient être les caractéristiques d'équipements automatiques de mesure et d'équipements de gestion à distance?

Note. – Voir les Avis 481, 482 et le Rapport 553.

QUESTION 22-1/4 *

UTILISATION DE SYSTÈMES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE EN CAS DE CATASTROPHES NATURELLES, ÉPIDÉMIES, FAMINES ET SITUATIONS CRITIQUES ANALOGUES POUR LES AVERTISSEMENTS ET LES OPÉRATIONS DE SECOURS

(1972-1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des télécommunications rapides et fiables sont essentielles pour les opérations de secours en cas de catastrophes naturelles, d'épidémies, de famines et d'autres situations critiques analogues;

b) que les systèmes à satellites géostationnaires sont capables d'assurer des services de télécommunication pour aider à réduire les pertes causées du fait de ces situations critiques;

---

* Voir également les Questions 22/3, 22/8 et 20/9.

c) que, à la suite des dégâts qu'ils ont subis ou pour d'autres raisons, les moyens de télécommunication normaux des zones sinistrées sont fréquemment insuffisants pour les opérations de secours et que les ressources locales ne permettent pas de les rétablir ou de les compléter rapidement;

d) que la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales, Genève, 1971, a adopté la Recommandation N° Spa2 – 13;

e) que l'utilisation des systèmes de radiocommunications spatiales constitue un moyen d'établir des télécommunications rapides et fiables destinées aux opérations de secours;

f) qu'il convient de réduire à un minimum le coût des installations nécessaires à cet effet, mais que ces installations pourraient être amenées à remplir diverses fonctions telles que diffusion à la voix d'avertissements, comptes rendus d'opérations sur le terrain, rassemblement de données et coordination des opérations de secours,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les caractéristiques et les bandes de fréquences préférées pour des stations terriennes transportables du service fixe par satellite afin d'assurer des télécommunications de secours;

2. quels sont les critères destinés à assurer la compatibilité entre les stations du service fixe par satellite et les stations destinées aux télécommunications de secours qui pourraient être assurées par le service mobile par satellite ou par les services de radiocommunication de Terre?

Note. – Voir le Rapport 554.

QUESTION 23/4

STATIONS TERRIENNES DE FAIBLE CAPACITÉ ET SYSTÈMES A SATELLITES CORRESPONDANTS

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) la Résolution N° 18 de la Conférence de plénipotentiaires, Malaga-Torremolinos, 1973;

b) qu'un certain nombre d'administrations et, de façon urgente, celles des pays en voie de développement ont besoin d'utiliser des stations terriennes de faible capacité ainsi que des systèmes associés à ces stations;

c) qu'il est nécessaire d'incorporer des systèmes de faible capacité dans le réseau international des télécommunications;

d) qu'il est nécessaire de recueillir de plus amples renseignements sur les problèmes techniques et sur les questions d'exploitation pour faciliter la mise au point de stations terriennes économiques de faible capacité et des systèmes associés;

e) que ces systèmes peuvent fonctionner dans les bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quels sont les bandes de fréquences et les procédés de modulation préférés pour les systèmes de faible capacité;

2. quelles sont les caractéristiques de fonctionnement auxquelles il faut accorder la préférence pour les stations terriennes et les stations spatiales de ces systèmes;

3. quels critères faut-il définir pour ces systèmes afin d'assurer la compatibilité, d'une part, entre les systèmes de faible capacité, d'autre part, entre les futurs systèmes de faible capacité et les systèmes existants, dans le service fixe par satellite, notamment:

- en vue de faciliter l'interconnexion dans le réseau international des télécommunications;
- en vue de spécifier le partage des bandes de fréquences et l'utilisation optimale de l'orbite des satellites géostationnaires?

Note. – Voir le Rapport 869.

QUESTION 24-1/4

DISPONIBILITÉ DES CIRCUITS OU DES CONDUITS NUMÉRIQUES ET INTERRUPTIONS BRÈVES DE LA TRANSMISSION DANS LE SERVICE FIXE PAR SATELLITE POUR LA TÉLÉPHONIE ET LA TÉLÉVISION

(1974-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les circuits ou conduits numériques du service fixe par satellite peuvent être interrompus pendant des durées longues ou brèves, ces interruptions se manifestant normalement par une élévation du niveau du bruit de circuit, un abaissement du niveau du signal utile, des paquets d'erreurs sur les bits dans les systèmes numériques ou par la présence de signaux indésirables;

b) que les interruptions des circuits ou conduits numériques sont dues à l'affaiblissement ou à la dépolarisation causés par les hydrométéores aux liaisons radioélectriques, à la réception d'un niveau élevé de brouillage ou de bruit radioélectrique, à un défaut de fonctionnement du matériel au fonctionnement d'un dispositif de commutation de protection ou de commutation pour diversité d'emplacement ainsi qu'à des phénomènes transitoires affectant l'alimentation en énergie;

c) que, par convention, les interruptions d'une durée égale ou supérieure à 10 s traitées comme une perte de disponibilité du circuit ou du conduit numérique alors que les interruptions de moins longue durée sont traitées comme des interruptions brèves du circuit;

d) que les Avis en vigeur ne fixent pas d'objectifs pour la durée et fréquence d'occurence des interruptions brèves (ni pour la disponibilité du circuit) dans le service fixe par satellite;

e) que le degré de disponibilité d'un circuit ou d'un conduit numérique et les objectifs em matière d'interruptions brèves ont de profondes répercussions sur la conception des systèmes, leur coût, leur exploitation et leur maintenance;

f) que les interruptions brèves de la transmission et les paquets d'erreurs peuvent entraîner la perte du synchronisme dans les systèmes de transmission numérique;

g) que l'on peut recourir à des dispositifs de protection afin d'améliorer la disponibilité des circuits ou des conduits numériques;

h) que le matériel des stations terriennes peut comporter des dispositifs qui bloquent les récepteurs lorsque le niveau de bruit devient élevé ou que la puissance de l'onde porteuse reçue subit une chute de niveau importante,

DÉCIDE A LA UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. Comment faut-il appliquer la définition de la disponibilité des circuits ou des conduits numériques dans le service fixe par satellite;

2. quels devraient être les objectifs en matière de disponibilité des circuits ou des conduits numériques pour les systèmes actuellement en service et pour les sytèmes de l'avenir, entre les points définis par le circuit fictif de référence ou par le conduit numérique fictif de référence;

3. quelle est la disponibilité des circuits actuellement obtenue dans le service fixe par satellite;

4. quels devraient être les objectifs en matière de durée et de fréquence d'occurrence des interruptions brèves de la transmission, des bref paquets d'erreurs et des variations brusques du niveau dans la bande de base pour les systèmes actuellement en service et pour les systèmes de l'avenir, entre points définis par le circuit fictif de référence ou par le conduit numérique fictif de référence;

5. quelles sont, du point de vue statistique, dans les réseaux du service fixe par satellite de conception actuelle, la durée et la fréquence d'occurrence des interruptions brèves de la transmission, des brefs paquets d'erreurs et des variations brusques du niveau dans la bande de base;

6. quels sont les facteurs importants qui influencent la disponibilité et les interruptions brèves des circuits ou des conduits numériques comme les interruptions de la transmission, les paquets d'erreurs sur les bits et les variations du niveau dans la bande de base; quels sont en particulier les effets des facteurs suivants:

6.1 fiabilité des stations terriennes et des satellites, y compris les effets des dispositifs de protection,

6.2 diversité d'emplacement des stations terriennes,

6.3 brouillages d'origine solaire,

6.4 affaiblissement et dépolarisations dus aux hydrométéores,

6.5 interruptions dues à des conditions météorologiques extrêmes,

6.6 brouillages causés par d'autres réseaux à satellite ou prenant naissance dans le même réseau à satellite,

6.7 brouillages causés par fes faisceaux hertziens de Terre,

6.8 phénomènes transitoires dans l'alimentation en énergie.

Note. – Voir les Avis 482 et 579 et le Rapport 706.

PROGRAMME D'ÉTUDES 24A-1/4

INTERRUPTIONS DU TRAFIC SUR LES CIRCUITS OU CONDUITS NUMÉRIQUES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la continuité du trafic sur les liaisons du service fixe du satellite peut être interrompue par suite d'une défaillance des matériels ou d'effets introduits par des phénomènes naturels (brouillage causé par le Soleil, affaiblissement dû aux hydrométéores);

b) que les interruptions peuvent être classées en interruptions autoréparables (commutation de protection, hydrométéores) et en interruptions dont la durée comprend le temps de la remise en état;

c) que la diversité des emplacements des stations terriennes et la commutation de protection permettent de transformer des interruptions de longue durée en interruptions très brèves ou même de prévenir complètement toute interruption de la liaison;

d) qu'aux termes des Avis 353, 354 et 522, une valeur élevée de la puissance de bruit ou un taux d'erreur élevé sur les éléments binaires peuvent être tolérés sur de très courtes périodes, pendant un très faible pourcentage de temps; que la disponibilité des circuits ou conduits numériques est défavorablement influencée par des interruptions de durée supérieure à environ 10 s et que la qualité des circuits ou conduits numériques subit également les effets d'interruptions momentanées du trafic, généralement plus courtes que 10 s;

e) que le CCITT est invité à donner son avis sur le niveau de bruit qu'il considère comme l'équivalent d'une interruption totale, et qu'il étudie la durée et la fréquence d'occurrence des courtes interruptions de la transmission et des variations brusques du niveau sur un circuit téléphonique international;

f) que les interruptions du trafic peuvent se manifester par de brusques variations du niveau dans la bande de base, par la disparition complète du signal utile ou par un niveau de bruit élevé, ou bien, dans le cas des systèmes de transmission numériques, par des erreurs groupées en rafales;

g) qu'il est noté dans l'Avis 522 qu'un complément d'étude est requis quant aux erreurs groupées en rafales;

h) que le CCITT, dans le paragraphe *c)* de son Avis G.221, a attiré l'attention sur le mauvais fonctionnement qui peut résulter de défaillances ayant engendré du bruit pouvant être ensuite transmis aux systèmes en aval, et que l'équipement d'une station terrienne peut comporter des dispositifs de commutation des récepteurs en cas de bruit excessif;

j) que, lors de la planification d'une liaison par satellite, des décisions doivent être prises en ce qui concerne les marges de protection des signaux reçus, la diversité des emplacements des stations terriennes et la commutation de protection, etc., dont dépendent dans une très grande mesure la diponibilité et les frais d'établissement de la liaison;

k) que les conditions requises pour la disponibilité des liaisons peuvent être différentes selon les applications des services (téléphonie assignée à la demande, transmission de données, télévision);

l) que la durée de certaines interruptions peut dépendre de la configuration du réseau à satellite, ou des circonstances suivantes: stations terriennes surveillées en permanence ou non surveillées au début de l'interruption, plus ou moins grande facilité d'orientation des antennes des stations terriennes permettant de pointer successivement un satellite puis un autre;

m) qu'il convient que les termes et les définitions se rapportant à ces études soient, dans toute la mesure possible, fondés sur des expressions adoptées par accord international,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. taux d'occurrence et durée des interruptions auto-réparables ou non auxquelles on peut s'attendre dans les systèmes modernes à satellite entre les points définis par le circuit ou conduit numérique fictif de référence;

2. proportion (en fréquence et en durée) d'interruptions causées par les effets de la propagation dans les liaisons par satellite avec ou sans protection assurée par la diversité des emplacements des stations terriennes;

3. caractéristiques préférées (temps de commutation) des dispositifs de protection des matériels;

4. proportion (en fréquence et en durée) des courtes interruptions de la transmission causées par des dispositifs de protection et/ou de réception en diversité (par commutation entre les emplacements des stations terriennes), dans les liaisons par satellite équipées de tels dispositifs;

5. proportion d'interruptions dues à la maintenance, y compris les erreurs imputables au personnel;

6. caractéristiques préférées des dispositifs destinés à prévenir un fonctionnement défectueux d'autres systèmes connectés en cascade en bande de base;

7. établissement d'une liste des termes et définitions actuellement utilisés dans les documents de plusieurs organismes internationaux s'occupant de terminologie, qui sont applicables aux études dont il s'agit, et d'une liste des termes et définitions supplémentaires qui pourraient être nécessaires.

Note. – Lorsqu'on effectue des études sur les interruptions qui affectent la disponibilité, il peut être utile d'établir une distinction entre les réseaux à satellite dont les stations terriennes sont toujours surveillées et dont les antennes sont facilement orientables, et d'autres réseaux à satellite qui ne réunissent pas ces conditions.

QUESTION 25-1/4 *

ÉMISSIONS NON DÉSIRÉES RAYONNÉES ET REÇUES PAR LES STATIONS TERRIENNES ET LES STATIONS SPATIALES DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1976-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le rayonnement d'émissions non désirées par les stations spatiales ou par les stations terriennes du service fixe par satellite risque de causer des brouillages à d'autres services;

b) que le rayonnement d'émissions non désirées par d'autres services risque de causer des brouillages aux stations spatiales et/ou aux stations terriennes du service fixe par satellite;

c) que les émissions non désirées provenant de stations spatiales ou de stations terriennes du service fixe par satellite risquent de causer des brouillages à d'autres stations de ce service;

d) que, en voulant réduire à une très faible valeur le niveau des émissions non désirées, surtout celles des stations spatiales, on peut se heurter à de sérieuses difficultés techniques;

e) que la sensibilité au brouillage des stations des divers services radioélectriques diffère sensiblement d'un service à un autre;

f) que l'Appendice 8 au Règlement des radiocommunications spécifie les niveaux maximaux tolérés des rayonnements non essentiels pour les bandes de fréquences au-dessous de 17,7 GHz;

g) que le CCIR n'a pas encore émis d'Avis relatifs aux émissions non désirées aux fréquences supérieures à 960 MHz;

h) que l'on ne dispose d'aucun renseignement sur les émissions non désirées en provenance de stations utilisant des techniques de modulation numérique dans les bandes de fréquences supérieures à 960 MHz;

j) que, par sa Recommandation N° 66, la CAMR-79 invite le CCIR à poursuivre l'étude des niveaux des rayonnements non essentiels dans toutes les bandes de fréquences, en insistant sur les bandes de fréquences, les services et les techniques de modulation qui ne sont pas actuellement traités dans l'Appendice 8 du Règlement des radiocommunications et, en particulier, sur les services spatiaux;

k) que, par sa Recommandation N° 507, la CAMR-79 invite le CCIR à poursuivre d'urgence l'étude du problème spécifique du brouillage que peuvent causer les rayonnements non essentiels en provenance de stations du service de radiodiffusion par satellite aux services assurés dans les bandes de fréquences adjacentes;

l) que, par sa Recommandation N° 61, la CAMR-79 invite le CCIR à poursuivre l'étude de normes techniques pour l'évaluation du brouillage préjudiciable et à recommander des critères techniques pour les bandes de fréquences supérieures à 28 MHz attribuées aux services de radiocommunication de Terre intéressés, afin de permettre à l'IFRB et aux administrations d'appliquer les critères ainsi définis pour ces bandes,

---

* Cette Question doit être portée à l'attention des Commissions d'études 1, 2, 7, 8, 9, 10 et 11.

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude d'urgence la question suivante:

1. quelle limite convient-il de fixer à la puissance des émissions non désirées rayonnées par les stations spatiales et les stations terriennes du service fixe par satellite dans les diverses bandes de fréquences afin de protéger ce service ainsi que les autres services, compte tenu des points 1 et 3 de la Recommandation N° 66 de la CAMR-79;

2. quelles sont les valeurs de la puissance surfacique produite par les émissions non désirées des stations d'autres services qui sont acceptables par les stations spatiales et terriennes du service fixe par satellite et quelles sont les caractéristiques techniques et d'exploitation qui résultent de la présence d'émissions non désirées de stations d'autres services, notamment de stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite, compte tenu de la Recommandation N° 507 de la CAMR-79?

Note. – Voir les Rapports 712 et 713.

QUESTION 26-1/4 *

ÉTABLISSEMENT DE LIAISONS DE CONNEXION ** ENTRE STATIONS TERRIENNES FIXES ET STATIONS SPATIALES DE DIVERS SERVICES, DANS DES BANDES DE FRÉQUENCES ATTRIBUÉES AU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1977-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des liaisons de connexion entre des stations terriennes fixes et des stations spatiales d'un service de radiocommunications spatiales quelconque peuvent actuellement être établies dans des bandes de fréquences attribuées au service fixe par satellite (numéro 22 du Règlement des radiocommunications, concernant les liaisons de connexion);

b) que certaines bandes attribuées au service fixe par satellite dans le sens Terre vers espace ont été réservées pour les liaisons de connexion aux stations spatiales du service de radiodiffusion par satellite;

c) qu'exception faite du point *b)* ci-dessus, les attributions au service fixe par satellite ne prévoient généralement pas de distinction entre les diverses applications possibles des bandes attribuées;

d) que certaines applications des liaisons de connexion sont du type unidirectionnel, ce qui peut conduire à une utilisation inefficace des bandes attribuées au service fixe par satellite pour des transmissions dans les deux sens;

e) que certains services spatiaux nécessitant des liaisons de connexion peuvent faire l'objet de plans, conformément aux Résolutions N^{os} 3 et 701 de la CAMR-79;

f) que, lors de la planification des services spatiaux, il convient de prévoir comme il se doit les liaisons de connexion mentionnées au point *e)*;

g) que les caractéristiques techniques des liaisons de connexion peuvent être très différentes de celles des liaisons qui appartiennent en totalité au service fixe par satellite et qu'il peut en résulter des hétérogénéités dans certaines bandes du service fixe par satellite;

h) que, du point de vue de la technique et de l'exploitation, il peut être souhaitable que tous les satellites d'un système utilisent des bandes de fréquences déterminées pour les liaisons de connexion, quels que soient l'emplacement orbital ou la date d'entrée en service;

j) que la construction de grandes stations spatiales avec intégration de multiples services peut ouvrir d'intéressantes perspectives afin d'utiliser la partie du spectre attribuée aux services spatiaux;

k) que l'étude de ces problèmes est déjà en cours, par exemple au titre des Programmes d'études 2K/4 et 2M/4, et que la poursuite des études est demandée en vertu de la Recommandation N° 101 et des Résolutions N^{os} 3, 101 et 701 de la CAMR-79;

l) qu'aux termes d'une disposition de la Recommandation N° 61 de la CAMR-79, le CCIR a été invité à poursuivre l'étude des normes techniques permettant d'évaluer le brouillage préjudiciable et à recommander des critères techniques pour les bandes de fréquences supérieures à 28 MHz attribuées aux services de radiocommunication spatiale, à la radioastronomie et aux services de radiocommunication de Terre intéressés, afin de permettre à l'IFRB et aux administrations d'appliquer les critères ainsi définis pour ces bandes,

---

* Cette Question doit être portée à l'attention des Commissions d'études 2, 7, 8, 9, 10 et 11.

** Une liaison de connexion peut comporter un trajet montant ou un trajet descendant ou les deux selon les besoins propres au service spatial considéré (pour la définition complète du terme, voir le N° 109 du Règlement des radiocommunications).

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont, pour les systèmes appartenant aux différents services spatiaux, les caractéristiques techniques qui influent sur la largeur de bande et sur le choix des bandes de fréquences pour les liaisons de connexion et quelles sont les caractéristiques techniques souhaitables de ces liaisons;

2. quels sont les avantages et les inconvénients techniques liés à l'établissement de liaisons de connexion dans des bandes attribuées au service fixe par satellite, et par quelles mesures spéciales pourrait-on accroître l'utilité des liaisons de connexion lorsqu'on emploie des bandes attribuées au service fixe par satellite;

3. quelles peuvent être les autres mesures souhaitables ou nécessaires concernant les liaisons de connexion et quels facteurs techniques peuvent déterminer si une partie quelconque de spectre ne convient pas aux liaisons de connexion à destination de satellites d'un service donné, par exemple pour les raisons suivantes:

3.1 difficultés de partage,

3.2 brouillage dans la bande adjacente,

3.3 contraintes de propagation;

4. quels sont les problèmes et les avantages techniques et opérationnels que présente l'établissement de liaisons de connexion, compte tenu de la coexistence de sous-systèmes appartenant à des services différents à bord d'une même station spatiale;

5. quels autres facteurs techniques et d'exploitation affecteraient l'établissement de liaisons de connexion dans les divers services spatiaux, ou seraient affectés par l'établissement de ces liaisons?

Note. – Voir le Rapport 561.

VŒU 56

DÉMARCATION ENTRE LES RESPONSABILITÉS DU CCIR ET DU CCITT POUR LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES A MULTIPLEXAGE PAR RÉPARTITION DANS LE TEMPS DU SERVICE FIXE PAR SATELLITE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que la Commission d'études XVIII du CCITT (anciennement Commission «spéciale D»), a suggéré, dans le Document COM Sp.D-N° 246, trois jonctions possibles CCIR/CCITT «A», «B» et «C» comme l'indique la Fig. 1,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

que le point «A» soit considéré comme le point de jonction le plus approprié, la raison en étant la complexité de l'interfonctionnement entre le modem, l'équipement AMRT et l'EJND. En conséquence, la définition des caractéristiques fonctionnelles de tous ces équipements devrait incomber à un seul organisme et il conviendrait que ce soit le CCIR.

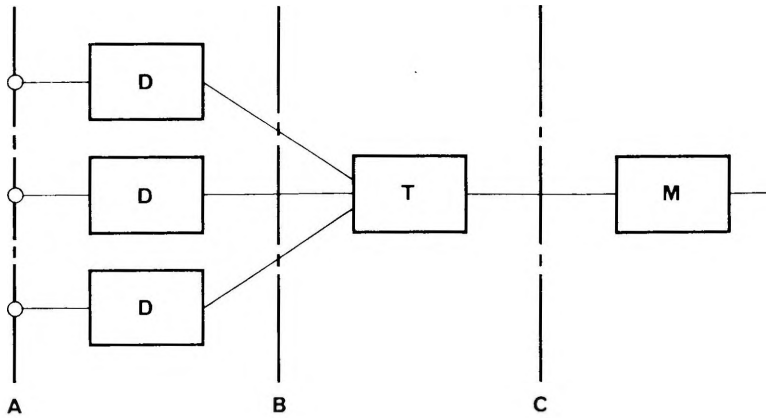


FIGURE 1 — *Points de jonction possibles A, B et C entre le réseau numérique de Terre et le réseau numérique par satellite, proposés par le CCITT dans le Document COM Sp.D–N° 246 (1973–1976)*

D: Equipement de jonction numérique directe (EJND)
T: Equipement à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT)
M: Modem

Note 1. — Dans un système autre qu'un système AMRT, l'élément T n'existera pas et les éléments D et M peuvent être combinés.

Note 2. — Voir le Rapport 707 pour une étude plus complète des caractéristiques des jonctions.

DÉCISION 2-4

PARTAGE DES FRÉQUENCES ENTRE SATELLITES DE RADIOCOMMUNICATION

Considérations techniques dont dépend l'utilisation rationnelle de l'orbite des satellites géostationnaires

(Programme d'études 2J/4)

(1970-1974-1976-1978-1980-1981)

La Commission d'études 4 du CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il faut effectuer d'urgence les études requises sur les considérations techniques dont dépend l'utilisation rationnelle de l'orbite des satellites géostationnaires en vue de la saturation prévisible de certaines parties de cette orbite;

b) que la CAMR-79, dans sa Recommandation N° 708, a demandé que l'on entreprenne ou que l'on poursuive, à titre prioritaire, des études sur un certain nombre de sujets liés à ce problème;

c) que, de plus, la CAMR-79 a décidé dans sa Résolution N° 3 qu'une Conférence administrative mondiale des radiocommunications spatiales sera convoquée en 1984 au plus tard afin de garantir concrètement à tous les pays un accès équitable à l'orbite des satellites géostationnaires et aux bandes de fréquences attribuées aux services spatiaux et que le Conseil administratif a maintenant fixé à juillet 1985 l'époque de la première session de la Conférence;

d) que le CCIR a été invité à effectuer des études préparatoires et à fournir à la première session de la Conférence des renseignements techniques concernant les principes, les critères et les paramètres techniques, y compris ceux dont on a besoin pour la planification des services spatiaux.

DÉCIDE

1. qu'il convient de maintenir le Groupe de travail intérimaire 4/1 créé sur l'initiative de la Réunion intérimaire de Genève, 1968, et qui a reçu le mandat suivant eu égard au service fixe par satellite:

1.1 stimuler le rassemblement (si nécessaire) et l'analyse critique des données pertinentes requises pour faire une synthèse des points de vue sur les moyens techniques permettant d'assurer l'efficacité d'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires (voir le Programme d'études 2J/4);

1.2 se réunir à nouveau aux dates qui seront fixées;

1.3 examiner les contributions qui auront été reçues lors de chacune de ces réunions et faire à leur sujet des rapports présentés sous la forme la plus appropriée pour faciliter la tâche de la Commission d'études 4 concernant l'utilisation efficace de l'orbite des satellites géostationnaires;

2. que ce Groupe de travail intérimaire sera composé de représentants désignés, à raison d'un par pays, par les Administrations des pays suivants: Algérie, Allemagne (République fédérale d'), Australie, Brésil, Canada, Chili, Chine (République Populaire de), Colombie, Etats-Unis d'Amérique, France, Guinée, Inde, Indonésie, Iran, Iraq, Italie, Japon, Papoua-Nouvelle-Guinée, Pays-Bas, Pologne (République Populaire de), République démocratique allemande, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Turquie, U.R.S.S., Yougoslavie (République socialiste fédérative de) ainsi que des observateurs de l'Union européenne de radiodiffusion, l'Agence spatiale européenne, INTELSAT, et l'IFRB;

3. que l'Administration du Royaume-Uni sera chargée de coordonner les travaux du Groupe de travail intérimaire qui, dans la mesure du possible, devront être conduits par correspondance, et qu'un représentant de cette Administration assumera la présidence du Groupe;

4. que les activités du Groupe de travail intérimaire ne devront entraîner aucune dépense extraordinaire pour l'UIT en dehors des dépenses normales;

5. que les résultats les plus récents des travaux du GTI 4/1 pourront être présentés comme contributions à examiner par la Réunion préparatoire du CCIR pour la Conférence (RPC).

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX ALPHABÉTIQUE DES TERMES (MOTS CLÉS) DU VOLUME IV

A

Accès multiple (R.384, R.552, R.554, R.707, R.708, R.869)
- accès multiple avec adresse par impulsions (AMAI) (R.708)
- accès multiple par étalement du spectre (AMES) (R.708)
- accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) (R.552, R.707, R.708)
- accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) (R.708)
- AMRT à commutation par satellite (AMRT-CS) (R.707, R.708)
- AMRT-AMRF (R.708)
- assignation en fonction de la demande (R.869)
- bilan d'erreur pour la technique AMRT (R.552)
- dispersion d'énergie pour AMRT (R.384)
- efficacité de la trame (R.708)
- jonction numérique pour AMRT (R.384)
- MRT-MIC-MDP-AMRF (R.708)
- multiplexage à répartition en fréquence et modulation de fréquence (MRF-MF) (R.708)
- SCPC-CMF (R.708)
- SCPC-MD-MDP (R.708)
- SCPC-MIC-MDP (R.708)
- SPADE (R.708, R.869)
- station terrienne de faible capacité (R.869)
- station terrienne transportable (R.554)
- une seule voie par porteuse (SCPC) (R.708, R.869)
- variation des longueurs de paquets (R.708)
- variation du débit des paquets (R.708)

Accès multiple par répartition en fréquence (voir Accès multiple)

Agence spatiale européenne (R.207)

Altitude de l'apogée (du périgée) (défin.) (R.204)

Annuleurs de brouillage (R.875)
- annulation au niveau de la bande de base (R.875)
- annulation au niveau de la FI (R.875)
- filtrage adaptable du brouillage à bande étroite (R.875)
- pont d'annulation du brouillage (R.875)
- système adaptable d'annulation dans la même voie (R.875)
- systèmes d'annulation adaptables (R.875)

Antennes de satellite (R.207, R.451, R.453, R.552, R.555, R.558, R.711)
- antenne-lentille à faisceaux multiples (R.558)
- contrapolarisation, polarisation croisée (R.453, R.555) (voir aussi Discrimination de polarisation)
- cornet conique (R.555)
- correction de polarisation (R.555)
- croisement des faisceaux (R.453)
- diagramme de rayonnement de référence (R.558)
- diagramme des lobes latéraux (R.453, R.558)
- diagramme du lobe principal (R.558)
- diagrammes de rayonnement (R.558)
- discrimination de polarisation (R.555) (voir aussi Discrimination de polarisation)
- éclairement de l'ouverture (R.558)
- effet de masque dans l'ouverture (R.558)
- enveloppes des lobes latéraux, effets (R.558)
- faisceau modèle (R.558)
- fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
- liaisons intersatellites (R.454)
- lobe latéral en coma (R.558)
- modelage des diagrammes de rayonnement (R.558)
- modelage du faisceau (R.558)
- orientabilité des antennes à faisceau étroit (R.558)
- plate-forme à stabilisation gyroscopique (R.451)
- réflecteur parabolique à alimentations multiples (R.558)
- réseau conformateur de faisceau (R.558)
- utilisation de l'orbite (R.558)

Antenne, couplage (voir Couplage entre antennes)

Antenne, dangers de rayonnements (R.390)
- puissances surfaciques maximales (R.390)
- réflexions sur le sol (R.390)
- valeurs de puissances surfaciques sûres (R.390)

Antenne, lobes latéraux, station terrienne (A.465, A.524, A.580, R.390, R.391, R.453, R.555)
- antenne asymétrique à optique grégorienne (R.390)
- antenne grégorienne asymétrique (R.390)
- antenne Cassegrain à alimentation excentrée (R.390)
- blocage et diffraction (R.390)
- brouillages dus au bruit solaire (R.390)
- contrapolarisation dans des lobes latéraux (R.555)
- débordement (R.390)
- diagramme de rayonnement (A.465, A.580, R.390, R.391, R.453, R.555)
- diagramme de rayonnement de référence (A.465, A.580, R.390, R.391)
- diffusion (R.390)
- dispositifs d'annulation du brouillage (R.390)
- distorsion de phase sur le diagramme d'alimentation (R.390)
- données des crêtes de rayonnement dans les lobes latéraux (R.391)
- facteur de protection de l'emplacement (R.390)
- fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
- illumination du réflecteur (R.390)
- orbite des satellites géostationnaires (R.453)
- p.i.r.e. hors axe (A.524)
- propriétés statistiques (R.391)
- rayonnement diffusé par les supports du réflecteur secondaire (R.390)
- réflecteur à alimentation excentrée (R.391)
- stations terriennes INTELSAT A et B (R.391)
- utilisation de la ressource orbite-spectre (R.555)

Antenne, température de bruit (R.390, R.868)
- absorption atmosphérique (R.390)
- antenne de réception de station terrienne (R.868, R.207)
- Cassiopée A (R.390)
- Cygnus A (R.390)
- mesure du G/T à l'aide de radiosources stellaires (R.390)
- mesures de radiosources stellaires (R.390)
- mesures de température de bruit (R.868)
- méthode du facteur y (R.868)
- pertes dans la vapeur d'eau et l'oxygène (R.868)
- pertes ohmiques (R.868)
- radiomètres (R.868)
- rayonnement cosmique en hyperfréquences (R.868)
- rayonnement de la Terre (R.868)
- station terrienne transportable (R.554)
- stations spatiales de réception (R.207)
- stations terriennes de faible capacité (R.869)

Antenne, température de bruit *(suite)*
stations terriennes du service fixe par satellite aux environs de 12 GHz (R.712, R.873)
stations terriennes du service fixe par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
température du ciel au zénith (R.868)

Antennes de stations terriennes (R.390, R.391)
antenne Cassegrain (R.390, R.391)
antennes multibande (R.390)
couplage (R.709)
dangers des rayonnements (R.390)
diagramme d'alimentation (R.390)
diagrammes de rayonnement (A.580, R.390, R.391)
diagrammes de rayonnement de référence (A.465, A.580, R.390, R.391, R.453, R.555)
diffractions (R.390)
discrimination de polarisation (R.390)
éclairement de l'ouverture (de l'antenne) (R.390)
écran (d'antenne) (R.869)
facteur de protection de l'emplacement (R.390)
facteur de qualité du système (R.390)
fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
gain du lobe principal (R.390)
lobes latéraux et arrière, niveau (A.465, A.580, R.390, R.391, R.453)
maintenance (R.553)
mesure de la température de bruit (R.868)
mesure des diagrammes d'antenne (R.390)
objectif de conception (A.580, R.390)
p.i.r.e. hors axe (A.524)
pointage et poursuite, spécifications (R.390)
polarisation croisée (contrapolarisation) (R.552)
polarisation orthogonale (R.394, R.555)
précision de la surface des réflecteurs (R.390)
protection contre les intempéries (R.390)
seuil de sécurité des rayonnements (R.390)
stations terriennes de faible capacité (R.869)
température de bruit (R.390)
température de bruit du système (R.390, R.555, R.868)
transportable (station terrienne) (R.554)
voisinage avec une liaison de Terre (R.709)
zone de Fresnel (R.390)

Apoastre (défin.) (R.204)

Apogée (défin.) (R.204)

Arc de service (défin.) (R.204)

Arc de visibilité (défin.) (R.204)

B

Bande de base, traitement (R.708)
codage pour la protection contre les erreurs (R.383, R.552, R.708)
commande par la voix (R.708)
commutateur commandé par la voix (R.708)
compresseurs-extenseurs instantanés (R.708)
compresseurs-extenseurs syllabiques (R.708)
compression-extension (R.708)
concentration des conversations (R.708)
concentration numérique des conversations (CNC) (R.708)
correction à demande automatique de répétition (ARQ) (R.708)
correction des erreurs vers l'avant (FEC) (R.708)
dispersion d'énergie (R.384)
modulation delta (MD) (R.708)
modulation MIC différentielle (R.708)
modulation par impulsions et codage (MIC) (R.708)
préaccentuation pour MF (R.464)

Brouillage admissible (A.353, A.466, A.523, A.524, R.455, R.867)
brouillage causé par télévision MF (R.867)
brouillage total dans une voie téléphonique MF-MRF (A.466)
canal de télévision (A.483, R.455, R.867)
compresseur-extenseur syllabique en mode SCPC (R.867)
critère de brouillage à source unique (A.523, A.466, R.867)
dispersion à la fréquence de ligne (R.867)
dispersion à la fréquence de trame (R.867)
p.i.r.e. maximale hors axe dans la bande des 6 GHz (A.524)
SCPC à modulation delta (R.867)
téléphonie MIC (A.523)
transmission numérique (R.455, R.867)
transmissions à une seule voie par porteuse (SCPC) (R.867)
voie téléphonique MF-MRF (A.353, A.466, R.455)

Brouillage causé par le service de radiodiffusion par satellite au service fixe par satellite (R.873) (voir aussi Protection du service fixe par satellite contre le brouillage causé par le service de radiodiffusion par satellite)
angle d'espacement topocentrique (R.873)
espacement entre satellites (R.873)
marge interservices (R.873)
partage interrégional (R.873)
p.i.r.e. (R.873)
potentiel de brouillage, évaluation (R.873)

Brouillage dans une voie téléphonique MF-MRF (A.466)
brouillage admissible dans une voie téléphonique (A.466)
bruit dû aux brouillages admissible pour chaque source (A.466)
gain d'antenne de stations terriennes de réception (A.466)
réutilisation des fréquences (A.466)

Brouillage en téléphonie MIC (A.523)
brouillage à source unique (A.523)
gain d'antenne de station terrienne de réception (A.523)
réutilisation des fréquences (A.523)
taux d'erreur binaire (A.523)

Brouillage maximum admissible (A.466, A.523)
discrimination de polarisation (R.555)

Brouillage, calcul pour déterminer s'il y a lieu de procéder à la coordination (R.452)
assignations de fréquences (R.454)
discrimination de polarisation (R.454)
fréquence de transposition (de conversion) (R.454)
répéteurs avec traitement du signal (R.454)
température de bruit équivalente sur liaison à satellite (R.454)

Brouillage, liaisons intersatellites (R.451, R.872, R.874)

Brouillage, répartition dans les systèmes numériques (R.710)
affaiblissement dû à la pluie (R.710)
brouillage contrapolaire dans la même voie (R.710)
brouillage extérieur (R.710)
brouillage intrasatellite (R.710)
commande de puissance, liaison montante (R.710)
corrélation des évanouissements (R.710)
dégradation de la marge d'une liaison à satellite (R.710)

Brouillage, répartition dans les systèmes numériques *(suite)*
liaison descendante, allocation de bruit et brouillage (R.710)
liaison montante, répartition de bruit et brouillage (R.710)
rapport de découplage (XPD) sur trajet de transmission (R.710)
répartition de brouillage, systèmes numériques aux fréquences supérieures à 10 GHz (R.710)

Bruit dans la bande de base (R.711)

Bruit, puissance de bruit admissible, circuit fictif de référence (A.353, R.208)
circuit fictif de référence (A.353)
interruptions courtes (A.353)
signal en bande de base (A.353)
téléphonie à MRF (A.353)
télévision (R.208)

C

CCITT (Comité consultatif international télégraphique et téléphonique) (A.353, A.482, A.521, A.522, R.207, R.208, R.214, R.383, R.451, R.553, R.707, R.708)

Choix de bandes de fréquences (R.88, R.205, R.451, R.869)
absorption atmosphérique (R.205, R.564, R.719, R.721)
affaiblissement dû aux hydrométéores (Voir Vol. V)
bruit d'absorption (Voir Vol. V)
bruit solaire (R.205, R.390)
rotation de Faraday (R.205) (voir aussi Vol. VI)
scintillation ionosphérique (R.205) (voir aussi Vol. VI)

Circuit fictif de référence (A.352, A.353, A.354, A.579, R.202)
affaiblissement dû à la pluie (R.208)
largeur de bande vidéo (A.352, R.208)
niveaux de bruit, objectifs (A.353, R.208)
objectif de disponibilité (A.579)
puissance de bruit admissible MF-MRF (A.353, R.208)
rapport porteuse/bruit thermique, liaison descendante (R.208)
signal dans la bande de base à spectre uniforme (A.353)
stations terriennes en diversité d'emplacement (A.352)
téléphonie MRF (A.352, A.353, R.208)
télévision (A.352, A.354, R.208)
température de bruit (R.208)
trafic national, normes (R.208)
transmission analogique (A.352)

Comité international d'enregistrement des fréquences (IFRB) (A.466, A.523, R.870)

Commande d'orientation (R.453)

Commission électrotechnique internationale (CEI) (R.552)

Comstar, système (R.207)

Conduit numérique fictif de référence (A.521, A.522)
courtes interruptions (A.522)
équipement de jonction numérique (R.521)
objectifs de taux d'erreur (A.522)
stations terriennes en diversité d'emplacement (A.521)
taux d'erreur binaire (A.522)
téléphonie MIC (A.522)
transmission numérique (R.521)

Coordination (R.451, R.454, R.870) (voir aussi Vol. IV et IX, partie 2)
calcul de brouillages (R.454)
critères de brouillage (R.454, R.870)
discrimination de polarisation (R.454)
distances de coordination (R.206) (voir aussi Vol. IV et IX, partie 2)
domaines de brouillage (R.870)
espacements orbitaux, programmes (R.870)
méthode fondée sur la densité de puissance (R.870)
méthode fondée sur la puissance de la porteuse (R.870)
méthodes de calcul (R.452, R.870)
méthodes de coordination (R.870)
méthodes de coordination technique (R.870)
moyens informatiques de calcul (R.870)
optimisation des assignations de fréquences, programmes (R.870)
processus de coordination (R.870)
réduction du brouillage (R.870)
service fixe de Terre (Vol. IV et IX, partie 2)
service intersatellite (R.451)
température de bruit équivalente d'une liaison par satellite (R.454, R.455, R.870, R.871)
Comité international d'enregistrement des fréquences (IFRB) (A.466, A.523, R.870)

Correction d'erreur (voir Numérique, système à satellites)

Couplage entre antennes (station terrienne et liaison de Terre) (R.709)
antenne de liaison de Terre (R.709)
entrelacement des fréquences (R.709)
facteur de couplage (R.709)
lobes latéraux (R.390) (voir aussi Antenne, lobes latéraux, station terrienne)
mesures de couplage (R.709)
méthodes utilisant le diagramme de rayonnement en champ lointain (R.709)
polarisation des antennes (R.709)
théorie géométrique de la diffraction (R.709)

COURIER (R.207)

Critères de partage des fréquences (voir Partage de fréquences)

D

Danger des rayonnements (R.390)

Diagramme de rayonnement des antennes de stations terriennes (A.465, A.580, R.390, R.391, R.453, R.555)
antenne à réflecteur à alimentation excentrée (R.391)
antenne Cassegrain (R.390, R.391)
antenne INTELSAT de type A (R.391)
antenne INTELSAT de type B (R.391)
crêtes des lobes latéraux (A.580)
diagramme de rayonnement de référence ($D/\lambda < 100$) (R.391)
diagramme de rayonnement de référence ($D/\lambda > 100$) (A.465, A.580, R.391)
diagrammes de rayonnement de référence de station terrienne pour coordination de 2 à 10 GHz (A.465)
diffusion par les supports du réflecteur secondaire (R.390)
gain du premier lobe latéral (R.390, R.391)
polarisation (R.390, R.391)
propriétés statistiques des lobes latéraux (R.391)
relevé des diagrammes d'antennes (R.391)

Discrimination de polarisation (R.390, R.453, R.552, R.555)
affaiblissement différentiel et déphasage (R.555)
antennes de station terrienne (R.390, R.391, R.555)
antennes des satellites (R.555)
correction de polarisation (R.555)
crêtes contrapolaires des lobes latéraux (R.555)
dépolarisation (R.555)
dépolarisation à la réception, mesure (R.555)
dépolarisation d'émission, mesure (R.555)

Discrimination de polarisation *(suite)*
diagramme de rayonnement contrapolaire (R.555)
efficacité de l'utilisation de l'orbite des satellites géostationnaires (R.453)
fréquences supérieures à 10 GHz (R.555)
influence des lobes latéraux d'une station terrienne (R.391)
jonctions orthomodes (R.555)
méthode de l'antenne de référence (R.555)
pointage optique, méthode (R.555)
polariseurs des satellites (R.555)
polariseurs, stations terriennes (R.555)
poursuite de polarisation (R.555)
précipitations, effets (R.555)
rotation de Faraday (R.555)
satellites adjacents sur l'orbite géostationnaire (R.453)
taux d'ellipticité, polariseurs (R.555)

Dispersion de l'énergie dans l'utilisation de l'orbite (A.453)

Dispersion de l'énergie pour modulation numérique (A.446, R.384)
AMRT, systèmes (R.384)
auto-embrouilleur (autobrasseur) (R.384)
embrouilleur (brasseur) (R.384)
facteur de dispersion de l'énergie (R.384)
générateur de code pseudo-aléatoire (R.384)
signaux numériques MDP (R.384)

Dispersion de l'énergie pour système de télévision (R.384)
annulation du signal de dispersion (R.384)
contre-réaction de fréquence (R.384)
dispersion de l'énergie de la porteuse (A.446, R.384)
fixation de niveau du noir (R.384)
linéarité de transmission (R.384)
signal de dispersion d'énergie à la fréquence de ligne (R.384)
transformation du signal vidéo, dispersion par (R.384)

Dispersion de l'énergie pour systèmes analogiques à MF (A.446, R.384)
bande de bruit à basse fréquence, dispersion par (R.384)
commande automatique de l'excursion de fréquence (R.384)
dispersion artificielle de l'énergie (R.384)
dispersion par bande de bruit (R.384)
dispersion sinusoïdale (R.384)
dispersion triangulaire (R.384)
entrelacement des fréquences porteuses MF (R.453)
ondes de dispersion (R.384)
téléphonie multivoie, systèmes (R.384)

Disponibilité (A.579, R.706)
circuit fictif de référence (A.579)
conduit numérique fictif de référence (A.579)
disponibilité de circuits bidirectionnels (R.706)
disponibilité des circuits (R.706)
interruptions (R.706)
mesure de la disponibilité des circuits (R.706)
service fixe par satellite (R.706)

E

Echo (voir Temps de propagation et écho)

Eléments d'une orbite (défin.) (R.204)

Erreur de pointage du faisceau (R.453, R.869)

Exploitation et maintenance (R.553) (voir Maintenance)

F

Facteur de qualité (G/T) (R.390, R.552, R.868) (voir aussi Antenne, température de bruit)
absorption atmosphérique (R.390)
Cassiopée A (R.390)
Cygnus A (R.390)
densité de flux des sources stellaires (R.390)
effets de polarisation (R.390)
étendue angulaire des radiosources stellaires (R.390)
évaluation des erreurs (R.390)
facteur intervenant dans l'utilisation orbite-spectre (R.453)
facteurs de correction (R.390)
fréquences supérieures à 10 GHz (R.552, R.868)
mesure, méthode utilisant des radiosources stellaires (R.390)
ondes radioélectriques émises par les planètes (R.390)
station terrienne de faible capacité (R.869)
station terrienne transportable (R.554)
stations terriennes de types courants (R.207)
Taurus A (R.390)
variation du flux avec la fréquence et le temps (R.390)

Fréquences supérieures à 10 GHz (voir aussi Service fixe par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz)

I

Inclinaison d'une orbite (défin.) (R.204)

Intermodulation (R.708, R.866)
bruit d'intermodulation (R.708, R.866)
dispositifs de prédistorsion (R.708)
stations terriennes (R.713)
systèmes à porteuses multiples (R.708)

IFRB (voir Comité international d'enregistrement des fréquences)

INMARSAT (Organisation internationale des télécommunications maritimes par satellite) (R.207, R.208)

INTELSAT (Organisation internationale des télécommunications par satellites) (R.207, R.451, R.553, R.554, R.555, R.556, R.558, R.561, R.706, R.708, R.709, R.712, R.713, R.867)

INTELSAT, système et satellites (R.207)

Interruptions prévisibles (R.206)

INTERSPOUTNIK (R.207)

INTERSPOUTNIK, système (R.207)

J

Jonction numérique (R.707)
AMRT à commutation par satellite (AMRT-CS) (R.707)
AMRT-CNC, techniques (concentration numérique des conversations) (R.707)
AMRT, systèmes (R.707)
base de temps de liaison par satellite (R.707)
commutation numérique (R.707)
conduit numérique fictif de référence (A.521)
connexion plésiochrone (R.707)
conversion analogique-numérique (R.707)
équipement de jonction numérique directe (EJND) (R.707)
glissement de trame, technique (R.707)
jonctions entre liaisons numériques internationales (R.707)
justification, techniques de (R.707)
mémoire-tampon élastique (R.707)
multiplexage MIC primaire (R.707)

Jonction numérique *(suite)*
réseaux à satellite et réseaux de Terre (R.707)
réseaux nationaux analogiques à commutation (R.707)
rythmes d'horloge (R.707)
signalisation et surveillance (R.707)
télévision numérique (R.707)
transmission des alarmes (R.707)
transmissions de signaux multiplex d'ordre supérieur (R.707)
transmultiplexeurs (R.707)

L

Largeur de bande et spectre (R.384, R.552, R.561, R.708, R.711)
analogiques (R.384)
facteur intervenant dans l'utilisation de l'orbite géostationnaire (R.711)
fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
liaisons de connexion (R.561)
linéarisation de TOP (R.708)
MF (R.384, R.561)
modulation numérique (R.384, R.708)
signaux numériques MDP (R.384)
techniques de dispersion d'énergie (R.384)
téléphonie multivoie (R.384)
télévision (R.384)
traitement de la bande de base (R.708)

Liaisons de connexion
attributions au SFS (espace vers Terre) pour liaisons de connexion (R.561)
attributions au SFS (Terre vers espace) pour liaisons de connexion (R.561)
attributions aux liaisons descendantes (R.561)
brouillages (R.561)
codage de la source (R.561)
discrimination de polarisation (R.561)
discrimination hors du lobe principal (R.561)
espacements entre satellites (R.561)
intégration son et image, systèmes (R.561)
largeur de bande nécessaire (R.561)
méthodes de modulation (R.561)
modulation à bande étroite (R.561)
rapport de protection total (R.561)
rapport porteuse/brouillage (C/I) (R.561)
réduction de la largeur de bande (R.561)
réutilisation des fréquences (R.561)
séparation des emplacements (R.561)
traitement du signal dans le satellite (R.561)

Liaisons intersatellites (A.451, R.453, R.872, R.874)
angle de séparation (R.451)
assignations de fréquences dans le même sens (R.451)
assignations de fréquences en sens opposé (R.451)
brouillage et coordination (R.451)
erreur de position dans le plan (R.451)
erreurs de pointage (R.451)
liaisons à courte distance (R.451)
liaisons de grande longueur (R.451)
liaisons intersatellites sans poursuite (R.451)
liaisons non identiques (R.451)
orbite des satellites géostationnaires (R.453)
partage des fréquences avec d'autres services (R.872, R.874)
puissance spectrale (R.451)
rapport porteuse/bruit avant détection (R.451)
réutilisation des fréquences (R.451)
service fixe par satellite (R.451)
technologie des équipements (R.451)
temps de propagation (R.453)
utilisation de l'orbite (R.451, R.453)

Liaisons numériques dont les signaux sont assujettis à des horloges différentes (R.707)

M

Maintenance (R.553)
appareils de mesure compatibles (R.553)
caractéristiques des filtres (R.553)
compatibilité des fréquences (R.553)
compatibilité des procédures de mesures (R.553)
équipement automatique d'essai (R.553)
stations terriennes (R.553)
stations terriennes sans surveillance (R.553)
système de contrôle et de commande (R.553)

Maintien en position (A.484, R.207, R.453, R.556)
capacité de l'orbite (R.556)
dérive longitudinale (R.556)
efficacité d'utilisation (de l'orbite géostationnaire) (R.556)
erreurs de détermination (R.556)
excentricité de l'orbite (R.556)
inclinaison de l'orbite (R.556)
possibilités de maintien en position en longitude (A.484, R.556)
propulsion secondaire, systèmes (R.556)
stations de mesure (R.556)
systèmes à satellites de types courants (R.207)
systèmes de faible capacité (R.869)
variations de la période orbitale (R.556)

Modulation (R.384, R.453, R.464, R.551, R.552, R.561, R.562, R.702, R.708, R.867) (voir aussi Accès multiple, Répéteur de satellite, Bande de base, traitement)
delta, système en mode SCPC (une seule voie par porteuse) à modulation delta (R.867)
démodulation cohérente (R.708)
démodulation différentielle (R.708)
dispersion d'énergie (R.384)
élargissement du spectre (R.708)
facteur de charge (R.708)
fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
influence sur l'utilisation de l'orbite (R.453)
jonction numérique (R.707)
liaisons de connexion (R.561)
MA en quadrature avec codage quadridimensionnel (R.708)
modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU) (R.708)
modulation de fréquence (MF) (R.464, R.708)
modulation mixte d'amplitude et de phase (MAP) (R.708)
modulation par déplacement de phase (MDP) (R.708)
modulation par déplacement minimal (MDM) (R.708)
numérique (R.708)
préaccentuation en MF (A.464)
précompensation (R.708)
rapport énergie par bit/densité spectrale de bruit (R.708)
télévision (R.384)
transmission de l'information à débit variable (R.552)
une seule voie par porteuse (SCPC) (R.867)

MOLNIYA-I, système et satellites (R.207)

N

Nœud ascendant (descendant) (défin.) (R.204)

Numériques; systèmes à satellite (voir aussi Numérique, interface)
- accès multiple (R.708)
- concentration numérique de la parole (R.707, R.708)
- conduit numérique fictif de référence pour la téléphonie MIC (A.522)
- conduit numérique fictif de référence pour les systèmes utilisant la transmission numérique (A.521)
- correction d'erreur (R.338, R.502, R.552, R.708)
- fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
- influence du temps de propagation (R.383)
- jonction numérique (R.707)
- modulation (R.708)
- objectif de disponibilité (A.579)
- partage de fréquences (R.455)
- répartition de brouillage (R.710)
- technique de la dispersion d'énergie (R.384)
- valeurs admissibles du taux d'erreur sur les éléments binaires (A.522)

O

ONU (R.207)

ORBITA, réseau de distribution (R.207)

Orbite (défin.) (R.204)

Orbite circulaire (défin.) (R.204)

Orbite des satellites géostationnaires (défin.) (R.204)

Orbite des satellites géostationnaires (défin.) (R.204) (voir aussi Orbite, caractéristiques)

Orbite des satellites géostationnaires, efficacité d'utilisation (voir aussi Utilisation orbite-spectre)

Orbite directe (rétrograde) (défin.) (R.204)

Orbite elliptique (défin.) (R.204)

Orbite équatoriale (défin.) (R.204)

Orbite inclinée (défin.) (R.204)

Orbite non perturbée (défin.) (R.204)

Orbite polaire (défin.) (R.204)

Orbite-spectre, utilisation de la ressource (R.453, R.711) (voir aussi Brouillage, Coordination, Partage de fréquences)
- antennes de satellites à faisceau étroit (R.453, R.711)
- appariage des bandes de fréquences (R.453)
- arcs de service (R.453)
- assignations de fréquence interverties (R.453, R.557)
- assignations de fréquences, optimisation (R.453)
- bandes de fréquences supérieures à 10 GHz (R.453)
- brouillage à source unique (R.453)
- brouillage, calculs (R.453)
- bruit de brouillage (R.453, R.871)
- bruit de brouillage dans la bande de base (R.711)
- bruit thermique dans la bande de base (R.711)
- caractéristiques géographiques (R.453)
- commande d'orientation (R.453)
- couple identique, méthode (R.711)
- couples multiples de bandes de fréquences (R.453)
- courants de trafic (R.453)
- diagramme de rayonnement de référence de station terrienne (A.465)
- diagramme de rayonnement de station terrienne (A.465, A.580, R.390, R.391)
- diagrammes de rayonnement (R.453) (voir aussi Antennes)
- diagrammes de rayonnement d'antennes (R.558)
- discrimination de l'antenne de la station terrienne (R.453)
- discrimination de l'antenne du satellite (R.453)
- discrimination de polarisation (R.453) (voir aussi Discrimination de polarisation)
- discrimination de polarisation (R.555)
- dispersion de l'énergie (R.453)
- diversité d'emplacement (R.453)
- division de l'orbite (R.453)
- division du spectre (R.453)
- efficacité d'utilisation de l'orbite (R.711)
- efficacité d'utilisation de la largeur de bande (R.711)
- emplacements des satellites, choix (R.453)
- espacement des satellites (R.453)
- espacement orbital (R.453)
- facteur d'utilisation (total) (R.453)
- facteur d'utilisation de l'arc (R.711)
- facteur d'utilisation du service (R.453)
- facteur de compatibilité (R.453)
- faisceaux croisés (R.453)
- faisceaux modèles (R.453)
- faisceaux ponctuels (R.711)
- fréquence de conversion (de transposition) (R.453)
- hétérogénéité d'émission (R.453)
- hétérogénéité de réception (R.453)
- informatique, application (R.453)
- liaisons intersatellites (R.453, R.711, R.872, R.874)
- lobes latéraux, discrimination de polarisation (R.453)
- lobes latéraux, niveaux (R.453)
- maintien en position (A.484, R.453, R.486) (voir aussi Maintien en position)
- maintien en position (R.453, R.484, R.556) (voir aussi Maintien en position)
- mesure de l'utilisation de l'orbite-spectre (R.711)
- modulation, caractéristiques (R.453)
- niveau admissible de la p.i.r.e. hors axe (A.524)
- niveau admissible du brouillage dans un canal de télévision (A.483, R.455, R.867)
- niveau admissible du brouillage dans une voie téléphonique (A.353, A.466, R.455)
- niveau admissible du brouillage en mode SCPC (une seule voie par porteuse) (R.867)
- niveau admissible du brouillage en téléphonie MIC (A.523)
- niveau admissible du brouillage en transmission numérique (R.455, R.867)
- occupation de l'orbite (R.711)
- polarisation orthogonale (R.453)
- polarisations croisées, discrimination (R.453)
- porteuses co-canal (R.453)
- porteuses entrelacées (R.453)
- portion interdite de surface terrestre (R.711)
- précision de pointage du faisceau (R.453)
- programmation non linéaire, technique (R.453)
- propagation, conditions (R.453)
- puissance surfacique du service de radiodiffusion par satellite (R.712)
- rayonnement hors axe, niveau (R.453)
- réduction de la non-homogénéité (R.453)
- réutilisation des fréquences (R.453)
- segmentation de l'orbite (R.453)
- segmentation du spectre (R.453)
- service de radiodiffusion par satellite (R.453)
- service par zones, systèmes (R.711)
- services mobiles par satellite (R.453)
- stations terriennes de faible capacité (R.869)
- système homogène (R.453, R.711)

Orbite-spectre, utilisation de la ressource *(suite)*
téléphonie MRF-MF (R.711)
température de bruit équivalente d'une liaison par satellite (R.871)
utilisation de la même bande de fréquences pour les liaisons montante et descendante (R.557)

Orbite, caractéristiques (R.206)
brouillage d'origine solaire (R.206)
éclipse solaire (R.206)
interruptions prévisibles (R.206)
orbite fermée (trajectoire récurrente) (R.206)
redondance en satellites (R.206)
stations spatiales en phase non géostationnaires (R.206)
stations spatiales géostationnaires (R.206)
zone de couverture terrestre (R.206)

P

Partage de fréquences avec les systèmes de radiocommunications de Terre (voir Vol. IV et IX, partie 2)

Partage de fréquences entre le service fixe par satellite et les autres services dans la bande 14,0 à 14,4 GHz (R.560)
brouillage par émetteurs de radionavigation (R.560)
brouillage par satellites de radionavigation (R.560)
causes simultanées de brouillage (R.560)
protection des récepteurs de stations spatiales (R.560)
puissance surfacique par émetteur (R.560)
radars à sifflement (R.560)

Partage de fréquences entre le service intersatellites et d'autres services (R.872, R.874)
brouillages causés par le SRS (R.872, R.874)
liaisons intersatellites à 32-33 GHz (R.872)
service d'exploration de la Terre par satellite (R.874)
service de radiodiffusion par satellite (R.872, R.874)
service de recherche spatiale (R.874)
service intersatellites (R.872, R.874)

Partage de fréquences entre les liaisons intersatellites du service fixe par satellite et du service de radionavigation à 33 GHz (R.872)
brouillage causé par le service de radionavigation (R.872)
brouillage par liaisons intersatellites (R.872)
liaisons intersatellites, 32-33 GHz (R.872)
p.i.r.e. maximale (R.872)
puissance surfacique (R.872)

Partage de fréquences, même bande de fréquences attribuée à la fois pour les liaisons montantes et les liaisons descendantes (R.557)
antennes de satellite à faisceau étroit (R.557)
assignations de fréquence interverties (R.557)
brouillage avec services de Terre (R.557)
brouillage entre stations situées presque aux antipodes (R.557)
brouillage entre stations terriennes (R.557)
discrimination de polarisation (R.557)
espacement uniforme des satellites (R.557)
rapport d'utilisation relative de l'orbite (R.557)
rapport porteuse/brouillage (R.557)

Partage des fréquences entre les liaisons intersatellites (R.872, R.874)

Partage des fréquences entre réseaux du service fixe par satellite (R.455, R.557, R.874) (voir aussi Réutilisation des fréquences et Utilisation orbite-spectre)
aménagement optimal des porteuses (R.455)
brouillage, niveaux admissibles (R.455)
coordination entre réseaux (R.455)
critères de brouillage unique (R.455)
dispersion à la fréquence de ligne (R.455)
entrelacement des fréquences (R.455)
espacement entre satellites (R.455)
fractionnement de la bande de fréquences (R.455)
protection de porteuses MRF-MF (R.455)
protection de porteuses SCPC-MDP (R.455)
protection de porteuses SCPC-MF (R.455)
protection des porteuses AMRT (R.455)
rapport porteuse utile/porteuse brouilleuse (C/I) de la liaison descendante (R.455)
rapport porteuse/densité spectrale de brouillage (R.455)
rapport porteuse/densité spectrale de bruit (R.455)
rapport signal/bruit de brouillage après démodulation (R.455)
réutilisation des fréquences (R.204)
séparation dans l'espace (R.455)
séparation dans le temps et dans l'espace (R.455)
téléphonie MRF-MF (R.455)
télévision à MF (R.455)
température de bruit équivalente sur liaison à satellite, accroissement relatif (R.455)
transmissions numériques (R.455)

Périastre (défin.) (R.204)

Périgée (défin.) (R.204)

Période anomalistique (défin.) (R.204)

Période de révolution (défin.) (R.204)

Période de révolution sidérale (défin.) (R.204)

Période de rotation sidérale (défin.) (R.204)

Période nodale (défin.) (R.204)

Période orbitale (défin.) (R.204)

P.i.r.e. (A.524, R.552, R.554, R.561, R.712, R.873)
densité de p.i.r.e. hors axe (A.524)
satellite de radiodiffusion (R.561, R.712, R.873, R.874)
station terrienne transportable (R.554)
système à satellites à faible capacité (R.869)
système fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
systèmes à satellites du service fixe de types courants (R.207)
systèmes SCPC-MDP de téléphonie commandés par la voix (A.524)

Plan de l'orbite (défin.) (R.204)

Pluie : affaiblissement dû à la pluie (R.552, R.866) (voir aussi Vol. V)

Polarisation croisée (contrapolarisation) (voir Discrimination de polarisation)

Préaccentuation en modulation de fréquence, téléphonie MRF (A.464)
caractéristiques de préaccentuation (A.464)
réseaux de préaccentuation et de désaccentuation (A.464)

Premiers projets de satellites (R.207)

Protection du service fixe par satellite contre les émissions non désirées de satellites de radiodiffusion (R.712)
aucun spectre non utilisé (R.712)
émissions non désirées de satellites de radiodiffusion (R.712)
espacement orbital (R.712)
fréquence protégée (R.712)
puissance surfacique spectrale (R.712)
satellites voisins (R.712)
séparation angulaire (R.712)
séparation en fréquence (R.712)

Puissance de bruit admissible, circuit fictif de référence MF-MRF (voir Bruit, puissance de bruit admissible, circuit fictif de référence MF-MRF)

R

Radiocommunications spatiales, termes et définitions (R.204)
- corps principal (défin.) (R.204)
- engin spatial (défin.) (R.204)
- espace lointain (défin.) (R.204)
- satellite (défin.) (R.204)
- satellite actif (défin.) (R.204)
- satellite réflecteur (défin.) (R.204)
- sonde spatiale (défin.) (R.204)
- sonde spatiale lointaine (défin.) (R.204)

RADOUGA, système (R.207)

Rayonnements non essentiels
- angle de séparation géocentrique (R.713)
- brouillage des faisceaux hertziens (R.713)
- brouillage des stations «transhorizon» (R.713)
- brouillage des stations de radioastronomie (R.713)
- brouillage des stations terriennes de recherche spatiale (R.713)
- brouillage des stations terriennes du SFS (R.713)
- harmoniques (R.713)
- niveaux de puissance (R.713)
- oscillateurs locaux, fréquences fondamentales et harmoniques (R.713)
- produits d'intermodulation (R.713)
- puissance surfacique brouilleuse maximale admissible (R.713)
- signaux conjugués (R.713)
- stations spatiales (R.713)
- stations terriennes (R.713)

RELAY (R.207)

Répartition des brouillages, systèmes fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz (R.866)
- affaiblissement dû à la pluie (R.866)
- bruit d'intermodulation (R.866)
- commande de la puissance, liaison montante (R.866)
- diversité d'espace (R.866)
- évanouissements (R.866)
- systèmes analogiques MF (R.866)

Répéteur de satellite (R.207, R.384, R.708, R.713, R.867, R.869) (voir aussi Modulation, Accès multiple, Bande de base, traitement)
- commutation RF (R.708)
- dispersion d'énergie (R.384)
- émissions hors bande (R.708)
- linéarisation des tubes à ondes progressives (R.708)
- rayonnements non essentiels (R.713)
- recul de puissance de sortie (R.708)
- répéteurs à limitation stricte (R.708)
- répéteurs à traitement du signal (R.708)
- répéteurs linéaires (R.708)
- répéteurs quasi linéaires (R.708)
- répéteurs sans traitement à bord du satellite (R.708)
- répéteurs régénérateurs (R.708)
- SCPC (à une seule voie par porteuse) (R.867)
- systèmes à satellites de types courants (R.207)
- systèmes de faible capacité (R.869)
- traitement des trains de bits (R.708)

Réutilisation des fréquences (R.204, R.451, R.453)
- liaisons de connexion (R.561)
- liaisons intersatellites (R.451)
- réseau à satellite à réutilisation de fréquence (défin.) (R.204)
- réutilisation des fréquences sur l'orbite des satellites géostationnaires (R.453)

S

SATCOM, système (R.207)

Satellite à commande d'orientation (défin.) (R.204)

Satellite d'essai orbital (OTS) (R.207)

Satellite en phase (déconseillé) (défin.) (R.204)

Satellite expérimental de communication de capacité moyenne (CS) (R.207)

Satellite géostationnaire (défin.) (R.204)

Satellite géosynchrone (défin.) (R.204)

Satellite maintenu en position contrôlée (défin.) (R.204)

Satellite sous-synchrone (super-synchrone) (défin.) (R.204)

Satellite stationnaire (défin.) (R.204)

Satellite synchrone (défin.) (R.204)

Satellite synchronisé (défin.) (R.204)

Satellites commerciaux nationaux des USA (R.207)

Satellites de technologie des applications (ATS) (R.207)

SCORE (R.207)

Secours, opérations de (R.554)
- bande de fréquences (R.554)
- capacité en voies (R.554)
- méthodes de modulation (R.554)
- qualité des circuits (R.554)
- régions de catastrophes naturelles (R.554)
- station terrienne transportable (R.554)

Service de radiodiffusion par satellite (voir Liaisons de connexion, Partage de fréquences et Utilisation orbite/spectre)

Service fixe par satellite, fréquences supérieures à 10 GHz (R.552, R.866, R.869) (voir aussi Liaisons de connexion)
- affaiblissement dû à la pluie (R.552, R.868, R.869)
- affaiblissement sur la liaison montante (R.552)
- antenne de station terrienne (R.552)
- bilan d'erreur pour AMRT (R.552)
- bruit, bilan de, pour MRF-MF (R.552)
- code de correction des erreurs (R.552)
- commutation en diversité (R.552)
- conditions climatiques (R.552)
- débit variable de transmission de l'information (R.552)
- diamètre d'ouverture circulaire (R.552)
- diversité d'emplacement (R.552)
- diversité symétrique (R.552)
- facteur de qualité (G/T) (R.552)
- fréquences, choix pour une LID (R.552)
- interruptions causées par la pluie (R.552)
- largeur de bande, LID (R.552)
- liaisons d'interconnexion de diversité (LID) (R.552)
- modulation, conditions requises (R.552)
- partage des fréquences (R.552)
- précipitations, diffusion et absorption (R.552)
- régulation de puissance, liaison montante (R.552)
- répartition des brouillages (R.866)

Service fixe par satellite, fréquences supérieures à 10 GHz *(suite)*
température de bruit (R.552)
temps de propagation, différence (R.552)

SIRIO, système du satellite (R.207)

Station terrienne transportable (R.554)
amplificateur de puissance (R.554)
antenne (R.554)
p.i.r.e. de la station terrienne (R.554)
poids et dimensions (R.554)
rapport G/T du système (R.554)
récepteur à faible bruit (R.554)

Stations terriennes et système à satellites de faible capacité (R.869)
accès multiple avec assignation à la demande (AMAD) (R.869)
affaiblissement (R.869)
antennes à faisceau ponctuel (R.869)
bandes de fréquences (R.869)
brouillage avec faisceaux hertziens de Terre (R.869)
brouillage entre réseaux (R.869)
caractéristiques topographiques (R.869)
commande centralisée (R.869)
commande répartie (R.869)
consommation d'énergie primaire (R.869)
coordination de fréquences (R.869)
dépolarisation (R.869)
diffusion (R.869)
écran d'antenne (R.869)
émetteurs transistorisés (R.869)
équipements SCPC (R.869)
forme du faisceau d'antenne, station spatiale (R.869)
limites de puissance surfacique (R.869)
maintien en position, précision (R.869)
modulation et accès multiple, méthodes (R.869)
p.i.r.e. de la station spatiale (R.869)
pointage de l'antenne du satellite, précision (R.869)
position du satellite, choix (R.869)
propagation (R.869)
répéteur, gain et sensibilité (R.869)
stations terriennes rurales (R.869)
systèmes à satellites ruraux nationaux (R.869)
température de bruit des stations terriennes (R.869)
une seule voie par porteuse (SCPC) (R.869)

STATSIONAR-T, système (R.207)

SYMPHONIE, système (R.207)

SYNCOM (R.207)

Système brésilien de télécommunications par satellite (SBTS) (R.207)

Système canadien Anik-B (R.869)

Système rural de l'Alaska (R.869)

Systèmes (à satellites) nationaux (R.207)

T

Taux d'erreur sur les bits (A.522)
bilan d'erreur pour la technique AMRT (R.552)
codage pour la protection contre les erreurs (R.552, R.708)
comparaison de systèmes de modulation numérique (R.708)
conduit numérique fictif de référence (A.522)
correction automatique d'erreur (R.383)
interruptions courtes (A.522)
système de faible capacité (R.869)
téléphonie MIC (A.522)

Télécommunications par satellites, systèmes (R.207)

TELESAT, système (R.207)

TELSTAR (R.207)

Température de bruit équivalente et gain de transmission d'une liaison par satellite (R.871)
rapport gain de transmission/température de bruit équivalente de la liaison (R.871)
répéteurs-changeurs de fréquence simples (R.871)

Temps de propagation et écho (R.383, R.552)
compensateurs d'écho (R.383)
contrastes entre temps de propagation (R.383)
correction automatique d'erreur (ARQ) (R.383)
déformation en biais (R.383)
dispositif à temps de propagation variable (R.383)
dispositifs de protection contre l'écho (R.383)
diversité, fonctionnement (R.383)
liaison à plusieurs bonds (R.383)
liaison à un seul bond (R.383)
phototélégraphie (R.383)
prolongement de Terre (R.383)
service fixe par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz (R.552)
suppresseurs d'écho numériques (R.383)
télégraphie et transmission de données (R.383)
téléphonie (R.383)
télévision (R.383)
temps de propagation différentiel (R.383)
temps de propagation maximal (R.383)

Temps: accès multiple par répartition dans le temps (voir Accès multiple)

Termes et définitions (R.204)

U

UNESCO (R.207)

W

WESTAR, système (R.207)

Imprimé en Suisse — ISBN 92-61-01412-7