

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

RECOMMANDATIONS ET RAPPORTS DU CCIR, 1986

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

XVI[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
DUBROVNIK, 1986

VOLUME VI

PROPAGATION DANS LES MILIEUX IONISÉS

Genève, 1986

CCIR

1. Le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) est l'organe permanent de l'Union internationale des télécommunications qui est chargé «... d'effectuer des études et d'émettre des recommandations sur les questions techniques et d'exploitation se rapportant spécifiquement aux radiocommunications, sans limitation quant à la gamme de fréquences...» (Convention internationale des télécommunications, Nairobi, 1982, Première Partie, Chapitre I, Article 11, numéro 83).

2. Le CCIR doit notamment:

a) fournir les bases techniques à l'usage des conférences administratives des radiocommunications et des services de radiocommunication pour assurer l'utilisation efficace du spectre des fréquences radioélectriques et de l'orbite des satellites géostationnaires, sans négliger les besoins des divers services de radiocommunication;

b) recommander pour les systèmes de radiocommunication des normes de fonctionnement ainsi que des mesures techniques qui assurent l'efficacité et la compatibilité de leur interfonctionnement dans les télécommunications internationales;

c) recueillir, échanger, analyser, publier et diffuser des renseignements techniques résultant d'études du CCIR ou tous autres renseignements disponibles pour le développement, la planification et l'exploitation de systèmes de radiocommunication, y compris les mesures spéciales qui pourraient être nécessaires pour faciliter l'exploitation de ces renseignements dans les pays en développement.

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

RECOMMANDATIONS ET RAPPORTS DU CCIR, 1986

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

XVI[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
DUBROVNIK, 1986

BIBLIOTHÈQUE DE L'UIT GENÈVE

VOLUME VI

PROPAGATION DANS LES MILIEUX IONISÉS

Genève, 1986

ISBN 92-61-02752-0

PLAN DES VOLUMES I A XIV
DE LA XVI[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR

(Dubrovnik, 1986)

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.
VOLUMES 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-1	Service mobile terrestre. Service d'amateur. Service d'amateur par satellite.
VOLUME VIII-2	Service mobile maritime.
VOLUME VIII-3	Services mobiles par satellite (aéronautique, terrestre, maritime, mobile et radiodétermination). Service mobile aéronautique.
VOLUME IX-1	Service fixe utilisant les faisceaux hertziens.
VOLUME X-1	Service de radiodiffusion (sonore).
VOLUMES X/XI-2	Service de radiodiffusion par satellite (radiodiffusion sonore et télévision).
VOLUMES X/XI-3	Enregistrement sonore et télévisuel.
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 XVI[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 Recommandations, Rapports, Résolutions, Vœux, Décisions, Questions et Programmes d'études à l'intérieur des textes du CCIR sont celles de l'édition 1986, et seul le numéro principal est mentionné.

© UIT
Imprimé en France

RÉPARTITION DES TEXTES DE LA XVI[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU CCIR PARMI LES VOLUMES I À XIV

Les Volumes I à XIV, XVI[e] Assemblée plénière, contiennent tous les textes du CCIR actuellement en vigueur. Ils se substituent à ceux de l'édition de la XV[e] Assemblée plénière, Genève, 1982.

1. Recommandations, Rapports, Résolutions, Vœux et Décisions

1.1 *Indications sur la numérotation de ces texte.*

Les Recommandations, 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: Recommandation 253 pour la première version de la Recommandation, Recommandation 253-1 pour sa première révision, Recommandation 253-2 pour sa deuxième révision, et ainsi de suite. Cependant, dans le corps même du texte des Rapports et Recommandations, seul le numéro principal sera mentionné (par exemple, Recommandation 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 sucessives n'a pas été mentionné dans les tableaux. Pour plus de détails sur la numérotation, voir le Volume XIV-1.

1.2 *Recommandations*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
48	X-1	367	II	478	VIII-1
80	X-1	368-370	V	479	II
106	III	371-373	VI	480	III
139	X-1	374-376	VII	481-484	IV-1
162	III	377, 378	I	485, 486	VII
182	I	380-393	IX-1	487-493	VIII-2
205	X-1	395-405	IX-1	494	VIII-1
215, 216	X-1	406	IV/IX-2	496	VIII-3
218, 219	VIII-2	407, 408	X/XI-3	497	IX-1
239	I	410-412	X-1	498	X-1
240	III	414, 415	X-1	500	XI-1
246	III	417	XI-1	501	X/XI-3
257	VIII-2	419	XI-1	502, 503	XII
265	X/XI-3	428	VIII-2	505	XII
266	XI-1	430, 431	XIII	508	I
268	IX-1	433	I	509, 510	II
270	IX-1	434, 435	VI	513-517	II
275, 276	IX-1	436	III	518-520	III
283	IX-1	439	VIII-2	521-524	IV-1
290	IX-1	441	VIII-3	525-530	V
302	IX-1	443	I	531-534	VI
305, 306	IX-1	444	IX-1	535-538	VII
310, 311	V	446	IV-1	539	VIII-1
313	VI	450	X-1	540-542	VIII-2
314	II	452, 453	V	546-550	VIII-3
326	I	454-456	III	552, 553	VIII-3
328, 329	I	457, 458	VII	555-557	IX-1
331, 332	I	460	VII	558	IV/IX-2
335, 336	III	461	XIII	559-562	X-1
337	I	463	IX-1	564	X/XI-3
338, 339	III	464-466	IV-1	565	XI-1
341	V	467, 468	X-1	566	X/XI-2
342-349	III	469	X/XI-3	567-572	XII
352-354	IV-1	470-472	XI-1	573, 574	XIII
355-359	IV/IX-2	473, 474	XII	575	I
362-364	II	475, 476	VIII-2	576-578	II

1.2 *Recommandations (suite)*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
579-580	IV-1	607, 608	XIII	642	X-1 + XII
581	V	609-611	II	643-644	X-1
582, 583	VII	612, 613	III	645	X-1 + XII
584	VIII-1	614	IV-1	646-647	X-1
589	VIII-2	615	IV/IX-2	648, 649	X/XI-3
591	VIII-3	616-620	V	650-652	X/XI-2
592-596	IX-1	621	VI	653-656	XI-1
597-599	X-1	622-624	VIII-1	657	X/XI-3
600	X/XI-2	625-631	VIII-2	658-661	XII
601	XI-1	632-633	VIII-3	662-666	XIII
602	X/XI-3	634-637	IX		
603-606	XII	638-641	X-1		

1.3 *Rapports*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
19	III	319	VIII-1	491	XII
32	X-1	322	VI (1)	493	XII
109	III	324	I	496, 497	XII
111	III	327	III	499	VIII-1
122	XI-1	336	V	500-501	VIII-2
137	IX-1	338	V	509	VIII-3
176, 177	III	340	VI (1)	516	X-1
181	I	342	VI	518	VII
183	III	345	III	519-522	I
184	I	347	III	524-526	I
195	III	349	III	528	I
197	III	354-357	III	530	I
200	III	358	VIII-1	533, 534	I
203	III	363, 364	VII	535, 536	II
204, 205	IV-1	371, 372	I	536-541	II
208	IV-1	374-376	IX-1	542	VIII-1
209	IV/IX-2	378-380	IX-1	543	II
212	IV-1	382	IV/IX-2	546	II
214	IV-1	383-385	IV-1	548	II
215	X/XI-2	386-388	IV/IX-2	549-551	III
222	II	390, 391	IV-1	552-561	IV-1
224	II	393	IV/IX-2	562-565	V
226	II	395, 396	II	567	V
227-229	V	401	X-1	569	V
236	V	404, 405	XI-1	571	VI
238, 239	V	409	XI-1	574, 575	VI
249-251	VI	411, 412	XII	576-580	VII
252	VI (1)	420	I	584, 585	VIII-2
253-255	VI	430-432	VI	588	VIII-2
258-260	VI	434-437	III	607	IX-1
262, 263	VI	439	VII	610	IX-1
265, 266	VI	443-445	IX-1	612-615	IX-1
267	VII	448, 449	IV/IX-2	616, 617	X-1
270, 271	VII	451	IV-1	619	X-1
272, 273	I	453-455	IV-1	622	X/XI-3
275-277	I	456	II	624-626	XI-1
279	I	458	X-1	628, 629	XI-1
284, 285	IX-1	461	X-1	630	X/XI-3
287-289	IX-1	463-465	X-1	631-634	X/XI-2
292	X-1	468, 469	X/XI-3	635-637	XII
294	X/XI-3	472	X-1	639	XII
300	X-1	473	X/XI-2	642, 643	XII
302-304	X-1	476-478	XI-1	646-648	XII
311-313	XI-1	481-485	XI-1	651	I
314	XII	488	XII	653-657	I

(1) Publiés séparément.

1.3 *Rapports (suite)*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
659-668	I	795	X-1	943-947	X-1
670, 671	I	797-799	X-1	950	X/XI-3
672-685	II	800	X/XI-3	951-955	X/XI-2
687	II	801, 802	XI-1	956	XI-1
692-697	II	803	X/XI-3	958, 959	XI-1
699, 700	II	804, 805	XI-1	961, 962	XI-1
701-704	III	807-812	X/XI-2	963, 964	X/XI-3
706, 707	IV-1	814	X/XI-2	965-970	XII
710-713	IV-1	815-823	XII	972-979	I
714-724	V	826-842	I	980-988	II
725-729	VI	843-854	II	989-996	III
730-732	VII	857	III	997-1004	IV-1
735, 736	VII	859-865	III	1005-1006	IV/IX-2
738	VII	867-875	IV-1	1007-1010	V
739-742	VIII-1	876, 877	IV/IX-2	1011-1015	VI
743, 744	VIII-2	879-880	V	1016, 1017	VII
747-749	VIII-2	882-885	V	1018-1025	VIII
751	VIII-3	886-895	VI	1026-1044	VIII-2
760-766	VIII-3	896-898	VII	1045-1051	VIII-3
768	VIII-3	899-906	VIII-1	1052-1057	IX-1
770-773	VIII-3	908-915	VIII-2	1058-1072	X-1
774, 775	VIII-2	917-923	VIII-3	1073-1076	X/XI-2
778	VIII-1	925-929	VIII-3	1077-1089	XI-1
779-789	IX-1	930-934	IX-1	1090-1096	XII
790-793	IV/IX-2	936-942	IX-1		

1.3.1 *Note au sujet des Rapports*

La mention individuelle «adopté à l'unanimité» a été supprimee pour chaque Rapport. Les rapports contenus dans ce Volume sont 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	61	XIV-1	76	X-1
14	VII	62	I	78	XIII
15	I	63	VI	79-83	XIV-1
20	VIII-1	64	X-1	86, 87	XIV-1
23	XIII	66	XIII	88	I
24	XIV-1	71	I	89	XIII
26, 27	XIV-1	72, 73	V	90-95	XIV-1
33	XIV-1	74	VI	96	XI-1
39	XIV-1				

1.5 *Vœux*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	I	43	VIII-2	70-72	VII
11	I	45, 46	VI	73	VIII-1
14	IX-1	49	VIII-1	74	X-1
15	X-1	50	IX-1	75	XI-1
16	X/XI-3	51	X-1	77	XIV-1
22, 23	VI	56	IV-1	79-81	XIV-1
26-28	VII	59	X-1	82	VI
32	I	63	XIV-1	83	XI-1
35	I	64	I	84	XIV-1
38	XI-1	65	XIV-1	85	VI
40	XI-1	66	III	86	XIII
42	VIII-1	67-69	VI		

1.6 *Décisions*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	IV-1	45	III	61	II
3-5	V	50	V	63	III
6	VI	51	X/XI-2	64	IV-1
9-11	VI	52	X-1	65	VII
18	XII	53, 54	I	66	XI-1
19	XIII	56	I	67, 68	XII
27	I	57	VI	69	VIII-1
32	VIII-3	58	XI-1	70	IV-1
42	XI-1	59	X/XI-3	71	VIII-3 + X-1
43	X/XI-2	60	XI-1	72	X-1 + XI-1

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 VI

PROPAGATION DANS LES MILIEUX IONISÉS

(Commission d'études 6)

TABLE DES MATIÈRES

		Page
Plan des Volumes I à XIV de la XVI[e] Assemblée plénière du CCIR		II
Répartition des textes de la XVI[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 la propagation dans les milieux ionisés		XVII
Mandat de la Commission d'études 6 et Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 6		XIX

Section 6J – Caractéristiques de l'ionosphère et propagation

Rapport 725-2	Les propriétés de l'ionosphère	1
Rapport 886-1	Propriétés particulières à l'ionosphère aux latitudes élevées affectant les radiocommunications	15
Rapport 262-6	Propagation des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues dans et à travers l'ionosphère	36
Rec 371-5	Choix d'indices pour les prévisions ionosphériques à long terme	40
Rec 373-5	Définition des fréquences maximales de transmission	46
Rec 434-4	Atlas CCIR des caractéristiques ionosphériques	47
Rapport 340-5	Atlas CCIR des caractéristiques ionosphériques	48
Rapport 255-6	Prévisions à long terme de la propagation ionosphérique	48
Rapport 430-4	Amélioration du programme mondial d'observations ionosphériques pour la cartographie numérique	55
Rapport 726-1	Diffusion latérale et rétrodiffusion au sol et dans l'ionosphère	61
Rapport 250-6	Propagation ionosphérique à grande distance sans réflexions intermédiaires sur le sol	66
Rapport 1011	Modification artificielle de l'ionosphère par injection de produits chimiques	73
Rapport 887-1	Modèles de plasmas extraterrestres	76

Section 6K – Problèmes d'exploitation

Rec 313-5	Echange de renseignements en vue des prévisions à court terme et transmission des avertissements de perturbations ionosphériques	81
Rapport 727-2	Prévision à court terme des variations d'origine solaire des caractéristiques d'exploitation pour la propagation ionosphérique	86
Rapport 888-1	Prévision à court terme des fréquences critiques, des fréquences maximales utilisables d'exploitation et du contenu électronique total	94
Rapport 1012	Modélisation, pour l'exploitation, des conditions de propagation des ondes décamétriques aux latitudes élevées	102

		Page
Rapport 889-1	Evaluation en temps réel des voies de circuits radioélectriques ionosphériques	105
Rapport 890-1	Utilisation en exploitation de la diffusion latérale et de la rétrodiffusion	115
Rapport 249-6	Sondages ionosphériques sous incidence oblique	117

Section 6L — Facteurs affectant la conception des systèmes

Rapport 266-6	Caractéristiques de la propagation ionosphérique et du bruit qui entrent en jeu lors de la conception de systèmes de radiocommunication de Terre et de la planification des services. *(Evanouissements)*	123
Rapport 891-1	Caractéristiques d'antenne importantes pour l'analyse et la prévision des trajets de propagation de l'onde ionosphérique	138
Rapport 892-1	Calcul de la fiabilité des systèmes radioélectriques en ondes décamétriques	142
Rec 531	Effets ionosphériques qui influent sur les systèmes de radiocommunications comportant des engins spatiaux	149
Rapport 263-6	Les effets de l'ionosphère sur la propagation entre la Terre et l'espace	149
Rec 532	Modifications de l'ionosphère provoquées par des émissions de grande puissance	175
Rapport 574-2	Transmodulation ionosphérique	175
Rapport 728-2	Modifications de l'ionosphère provoquées par des émissions radioélectriques de grande puissance, à partir du sol	183
Rapport 893	Les satellites collecteurs d'énergie solaire et l'ionosphère	190
Rapport 251-4	Communications utilisant la propagation par impulsions météoriques	195
Rapport 260-3	Propagation par diffusion ionosphérique	204

Section 6M — Bruit radioélectrique naturel et artificiel

Rec 372-4	Utilisation des données sur le bruit radioélectrique	207
Rapport 258-4	Bruit radioélectrique artificiel	207
Rapport 322-3	Caractéristiques des bruits atmosphériques radioélectriques et applications	214
Rapport 342-5	Bruit radioélectrique dans l'ionosphère et au-delà	214
Rapport 254-6	Mesures du bruit radioélectrique atmosphérique engendré par les éclairs	228

Section 6N — Champ aux fréquences supérieures à 1,6 MHz

Rec 533-1	Evaluation du champ de l'onde ionosphérique et de l'affaiblissement de transmission aux fréquences supérieures à 2 MHz	237
Rapport 252-2	Méthode provisoire du CCIR pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde d'espace pour les fréquences comprises entre les limites approximatives de 2 et 30 MHz	237
Supplément au Rapport 252-2	Deuxième méthode informatique provisoire du CCIR pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre 2 et 30 MHz	237
Rec 621	Constantes numériques et procédure d'interpolation utilisées dans la méthode de prévision de la propagation de la CAMR HFBC	238
Rapport 894-1	Méthode simple de prévision de la MUF et du champ pour la propagation des ondes décamétriques	239
Rapport 253-4	Mesure du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 1,6 MHz	245
Rapport 571-3	Comparaisons entre les valeurs observées et les valeurs calculées des intensités des signaux transmis par l'onde ionosphérique aux fréquences comprises entre 2 et 30 MHz	257
Rapport 729-2	Evaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 1,5 MHz: état de la question	264

Page

Rapport 1013 Méthodes fondées sur l'utilisation de micro-ordinateurs pour l'évaluation des conditions de la propagation des ondes décamétriques et de la qualité de fonctionnement des circuits 268

Rec 534-2 Méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la Région E 271

Rapport 259-6 Propagation des ondes métriques par l'intermédiaire des couches normales, de l'ionisation sporadique de la Région E ou d'autres phénomènes d'ionisation anormale 295

Section 6P — Champ aux fréquences inférieures à 1,6 MHz

Rec 435-5 Prévision du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences comprises entre 150 et 1600 kHz 311

Rapport 432-2 Précision des prévisions du champ de l'onde ionosphérique dans les bandes 5 (ondes kilométriques) et 6 (ondes hectométriques) 334

Rapport 1014 Prévision du champ de l'onde ionosphérique pour la radiodiffusion en Région 2 dans la bande 1605-1705 kHz 339

Rapport 1015 Méthode de prévision du champ de l'onde ionosphérique pour la propagation vers les aéronefs à 500 kHz 360

Rapport 575-3 Méthodes de prévision du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences comprises entre 150 kHz et 1705 kHz 367

Rapport 431-4 Analyse de résultats de mesure de propagation de l'onde ionosphérique dans la bande comprise entre 150 et 1600 kHz 374

Rapport 265-6 Propagation de l'onde ionosphérique et qualité des circuits aux fréquences comprises entre 30 kHz et 500 kHz environ 390

Rapport 895-1 Propagation de l'onde ionosphérique et qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 30 kHz environ 408

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

Question 25-1/6 Propriétés de l'ionosphère 433

Programme d'études 25A/6 Propriétés particulières à l'ionosphère équatoriale affectant les radiocommunications 433

Programme d'études 25B/6 Propriétés particulières à l'ionosphère aux latitudes élevées affectant les radiocommunications 433

Programme d'études 25C/6 Propagation par diffusion latérale et rétrodiffusion 434

Programme d'études 25D-1/6 Propagation ionosphérique à grande distance sans réflexion intermédiaire sur le sol 434

Programme d'études 25E/6 Propagation radioélectrique à travers les milieux extraterrestres ionisés, solaires ou autres 435

Programme d'études 25F/6 Modification de l'ionosphère par des moyens chimiques 435

Question 26/6 Prévisions ionosphériques 436

Programme d'études 26A/6 Prévisions à long terme d'indices solaires et ionosphériques 436

Programme d'études 26B-1/6 Prévisions pour la propagation ionosphérique 436

Programme d'études 26C/6 Amélioration du programme mondial d'observations ionosphériques pour la cartographie numérique 437

Programme d'études 26D-1/6 Prévision de l'ionisation sporadique de la Région E 438

Question 27/6 Caractéristiques d'exploitation pour les radiocommunications ionosphériques y compris transionosphériques 438

Programme d'études 27A/6 Variations à court terme et perturbations des circuits radioélectriques ionosphériques 439

Programme d'études 27B-1/6 Evaluation des voies de circuits radioélectriques ionosphériques . . . 439

Programme d'études 27C/6 Gestion opérationnelle des fréquences des circuits radioélectriques ionosphériques 440

Programme d'études 27D/6 Diffusion latérale et rétrodiffusion (utilisation en exploitation) 440

Page

Question 28/6 Facteurs affectant la conception des systèmes 440

Programme d'études 28A/6 Caractéristiques de la propagation ionosphérique qui entrent en jeu lors de la conception de systèmes de radiocommunication de terre . . 441

Programme d'études 28B/6 Effets de l'ionosphère sur les radiocommunications spatiales aux fréquences inférieures à 1,6 MHz environ 441

Programme d'études 28C-1/6 Effets de l'ionosphère sur les systèmes spatiaux aux fréquences supérieures à 1,6 MHz environ 442

Programme d'études 28D-1/6 Caractéristiques de propagation qui affectent le partage du spectre radioélectrique entre systèmes de terre faisant intervenir la propagation ionosphérique 442

Programme d'études 28E-1/6 Problèmes particuliers de radiocommunications liés à l'ionosphère dans certaines régions géographiques 443

Programme d'études 28F-1/6 Effets ionosphériques dus à des émissions à grande puissance 443

Programme d'études 28G/6 Evaluation des caractéristiques des antennes utilisées pour la propagation ionosphérique 444

Question 29-1/6 Bruit radioélectrique 445

Programme d'études 29A-1/6 Bruit radioélectrique dans l'ionosphère et au-delà 445

Programme d'études 29B/6 Mesure du bruit radioélectrique atmosphérique engendré par les éclairs 446

Programme d'études 29C-1/6 Bruit radioélectrique artificiel 447

Programme d'études 29D/6 Niveaux de bruit prévus dans la bande de fréquences 535-1705 kHz dans la Région 2 447

Question 30/6 Champ de l'onde ionosphérique et qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences supérieures à 1,6 MHz 448

Programme d'études 30A-2/6 Evaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 1,6 MHz 448

Programme d'études 30B-2/6 Propagation des ondes métriques et décimétriques par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la Région E et d'autres régions de l'ionosphère 449

Programme d'études 30C/6 Elaboration de méthodes fondées sur l'utilisation de micro-ordinateurs pour l'évaluation des conditions de propagation des ondes décamétriques et de la qualité de fonctionnement des circuits 450

Question 31-1/6 Champ de l'onde ionosphérique et qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ 450

Programme d'études 31C-2/6 Méthode de calcul du champ de l'onde ionosphérique dans le service de radiodiffusion à ondes hectométriques destinée à être appliquée dans la Région 2 de l'UIT 451

Programme d'études 31D/6 Propagation de l'onde ionosphérique et qualité des circuits aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ 451

Résolution 4-3 Diffusion de renseignements relatifs aux indices fondamentaux pour la propagation ionosphérique 452

Résolution 63-2 Programmes d'ordinateur pour la prévision des caractéristiques ionosphériques, de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique et des bruits 452

Résolution 74 Détermination des nombres de taches solaires 456

Vœu 22-4 Sondages réguliers de l'ionosphère 457

Vœu 23-4 Observations nécessaires en vue de l'établissement des indices fondamentaux pour la propagation ionosphérique 458

Vœu 45-2 Appréciation des méthodes du CCIR pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique entre 2 et 30 MHz 458

		Page
Vœu 46-1	Etablissement d'un fichier central de résultats de mesures de champ en ondes hectométriques et kilométriques	459
Vœu 67	Observations géophysiques et solaires nécessaires pour la prévision à court terme de la propagation ionosphérique	465
Vœu 68	Banque de données concernant les mesures du champ de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes décamétriques	466
Vœu 69	Mesures de champ aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ	466
Vœu 82	Utilisation pour la prévision de foF2 d'un indice d'activité solaire (IG) déduit d'observations ionosphériques	467
Vœu 85	Mesures des caractéristiques du bruit radioélectrique atmosphérique	467
Décision 6-5	Champ et affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences supérieures à 1,6 MHz	468
Décision 9-4	Propagation de l'onde ionosphérique et qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 500 kHz environ	469
Décision 10-5	Caractéristiques d'exploitation pour les circuits radioélectriques ionosphériques	470
Décision 11-5	Propagation des ondes métriques et décimétriques par l'ionisation sporadique de la Région E et par d'autres régions de l'ionosphère	471
Décision 57-1	Analyse des méthodes de prévision de la propagation à utiliser en relation avec la radiodiffusion à ondes hectométriques, pour application dans la Région 2 de l'UIT	472

Index alphabétique des termes (mots clés) du Volume VI 475

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES SUPPRIMÉS À LA FIN DE LA PÉRIODE D'ÉTUDES 1982-1986

(Pour permettre de repérer plus facilement les divers textes, le numéro de page du Volume VI de la XV[e] Assemblée plénière (Genève, 1982) est indiqué.)

Texte	Titre	N° de la page Vol. VI Genève, 1982
Résolution 75	Méthode de prévision du champ de l'onde ionosphérique en ondes décamétriques destinée à être utilisée par la CAMR pour la radiodiffusion à ondes décamétriques	382
Décision 21-2	Bruit radioélectrique	397
Décision 36-1	Analyse des méthodes de prévision de propagation nécessaires à la Conférence administrative mondiale de radiodiffusion à ondes décamétriques	398

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX DES TEXTES PAR ORDRE NUMÉRIQUE

Page

SECTION 6J: Caractéristiques de l'ionosphère et propagation 1

SECTION 6K: Problèmes d'exploitation 81

SECTION 6L: Facteurs affectant la conception des systèmes 123

SECTION 6M: Bruit radioélectrique naturel et artificiel 207

SECTION 6N: Champ aux fréquences supérieures à 1,6 MHz 237

SECTION 6P: Champ aux fréquences inférieures à 1,6 MHz 311

RECOMMANDATIONS	Section	Page
Recommandation 313-5	K	81
Recommandation 371-5	J	40
Recommandation 372-4	M	207
Recommandation 373-5	J	46
Recommandation 434-4	J	47
Recommandation 435-5	P	311
Recommandation 531	L	149
Recommandation 532	L	175
Recommandation 533-1	N	237
Recommandation 534-2	N	271
Recommandation 621	N	238
RAPPORTS		
Rapport 249-6	K	117
Rapport 250-6	J	66
Rapport 251-4	L	195
Rapport 252-2 *	N	237
Supplément au Rapport 252-2 *	N	237
Rapport 253-4	N	245
Rapport 254-6	M	228
Rapport 255-6	J	48
Rapport 258-4	M	207
Rapport 259-6	N	295
Rapport 260-3	L	204
Rapport 262-6	J	36
Rapport 263-6	L	149
Rapport 265-6	P	390

RAPPORTS	Section	Page
Rapport 266-6	L	123
Rapport 322-3 *	M	214
Rapport 340-5 *	J	48
Rapport 342-5	M	214
Rapport 430-4	J	55
Rapport 431-4	P	374
Rapport 432-2	P	334
Rapport 571-3	N	257
Rapport 574-2	L	175
Rapport 575-3	P	367
Rapport 725-2	J	1
Rapport 726-1	J	61
Rapport 727-2	K	86
Rapport 728-2	L	183
Rapport 729-2	N	264
Rapport 886-1	J	15
Rapport 887-1	J	76
Rapport 888-1	K	94
Rapport 889-1	K	105
Rapport 890-1	K	115
Rapport 891-1	L	138
Rapport 892-1	L	142
Rapport 893	L	190
Rapport 894-1	N	239
Rapport 895-1	P	408
Rapport 1011	J	73
Rapport 1012	K	102
Rapport 1013	N	268
Rapport 1014	P	339
Rapport 1015	P	360

* Publié séparément.

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 LA PROPAGATION DANS LES MILIEUX IONISÉS

Texte	Titre	Volume
Recommandation 508	Emploi des données sur le bruit radioélectrique dans les études relatives à l'utilisation du spectre	I
Rapport 670	Niveau minimal de bruit externe: spécification mondiale (0,1 Hz à 100 GHz)	I
Rapport 841	Application des techniques informatiques à la gestion du spectre radioélectrique	I
Question 18/1	Conception des systèmes en vue d'une efficacité et d'une utilisation optimales du spectre	I
Question 44/1	Modèles de système pour l'évaluation de la compatibilité dans l'utilisation du spectre	I
Question 45/1	Critères techniques de partage des fréquences	I
Question 46/1	Bruits radioélectriques	I
Rapport 222	Influences du plasma artificiel dans les liaisons avec des engins spatiaux	II
Rapport 456	Bandes de fréquences préférées pour les émetteurs d'engins spatiaux utilisés comme balises	II
Rapport 683	Bandes de fréquences préférées pour la recherche dans l'espace lointain dans la gamme 1-20 GHz	II
Rapport 699	Limitations apportées par l'ionosphère aux observations au sol de la radioastronomie au-dessous de 20 MHz	II
Programme d'études 5A/2	Critères à appliquer pour l'évaluation des brouillages causés à la radioastronomie	II
Programme d'études 15A/2	Antennes pour systèmes de recherche spatiale	II
Question 20/2	Caractéristiques et effets des techniques radioélectriques pour la transmission de l'énergie	II
Recommandation 520	Utilisation de simulateurs de voie ionosphérique en ondes décamétriques	III
Rapport 111	Influence des écarts de fréquence, dus au passage dans l'ionosphère, sur les communications à grande distance, utilisant la manipulation par déplacement de fréquence	III
Rapport 549	Simulateurs de voies ionosphériques sur ondes décamétriques	III
Rapport 860	Critères à utiliser pour établir une distinction entre les diverses classes de fonctionnement	III
Question 7/3	Influence des écarts de fréquence, dus à la traversée de l'ionosphère, sur les communications à ondes décamétriques	III
Question 21/3	Simulateurs de voies ionosphériques sur ondes décamétriques	III
Décision 63	Utilisation de systèmes radioélectriques à commande automatique dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz pour desservir les zones à population clairsemée et pour les secours d'urgence	III
Rapport 564	Données sur la propagation et méthodes de prévision nécessaires pour les systèmes de télécommunication Terre-espace	V
Rapport 717	Atlas mondial de la conductivité du sol	V
Rapport 720	Emissions radioélectriques produites par les sources naturelles à des fréquences supérieures à 50 MHz environ	V
Rapport 884	Données sur la propagation nécessaires pour le service mobile maritime par satellite à des fréquences supérieures à 100 MHz	V
Rapport 1007	Distributions statistiques dans la propagation des ondes radioélectriques	V

Texte	Titre	Volume
Programme d'études 7C/5	Données de propagation nécessaires pour les services mobiles utilisant des systèmes de communication ou de radiorepérage par satellite	V
Question 53/8	Utilisation par le service mobile maritime de fréquences dans la bande 435-526,5 kHz	VIII
Question 60/8	Service de radiodiffusion et service de radionavigation aéronautique dans les bandes d'ondes kilométriques. *Brouillages entre Régions*	VIII
Question 31/9	Transmission d'énergie électrique au moyen de fréquences radioélectriques à partir d'un engin spatial	IX
Rapport 304	Caractéristiques des évanouissements en radiodiffusion sonore dans la Zone tropicale	X
Rapport 955	Radiodiffusion sonore par satellite pour récepteurs portatifs et récepteurs dans des véhicules automobiles	X/XI
Recommandation 431	Nomenclature des bandes de fréquences et de longueurs d'onde employées en télécommunication	XIII
Recommandation 573	Vocabulaire des radiocommunications	XIII
Recommandation 574	Emploi du décibel et du néper dans les télécommunications	XIII
Recommandation 607	Termes et abréviations relatifs aux quantités d'information en télécommunication	XIII
Recommandation 662	Termes et définitions	XIII
Recommandation 666	Abréviations et sigles utilisés en télécommunication	XIII
Résolution 66	Termes et définitions	XIII
Résolution 78	Présentation des textes relatifs à la terminologie	XIII
Résolution 89	Directives pour le choix des termes et l'élaboration des définitions	XIII
Décision 19	Termes et définitions	XIII

PROPAGATION DANS LES MILIEUX IONISÉS

COMMISSION D'ÉTUDES 6

Mandat:

Etudier, en vue d'améliorer les radiocommunications:

1. la propagation des ondes radioélectriques dans l'ionosphère et dans les régions ionisées situées au-delà de l'ionosphère;

2. les caractéristiques des bruits radioélectriques associés.

1982-1986	*Rapporteur principal:*	L. W. BARCLAY (Royaume-Uni)
	Vice-Rapporteurs principaux:	G. L. MUTTI (République de Zambie) Mlle G. PILLET (France)
1986-1990	*Rapporteur principal:*	L. W. BARCLAY (Royaume-Uni)
	Vice-Rapporteurs principaux:	G. L. MUTTI (République de Zambie) Mlle G. PILLET (France)

INTRODUCTION PAR LE RAPPORTEUR PRINCIPAL DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 6

1. Considérations générales

Les textes de la Commission d'études contenus dans le Volume VI de la XV^{e} Assemblée plénière (Genève, 1982) ont été revus à la réunion intérimaire de septembre 1983 et à la réunion finale de septembre 1985, d'après les contributions des administrations et des Groupes de travail intérimaires. Pendant cette période, la Commission d'études s'est plus particulièrement attachée à fournir, sur demande, des précisions techniques pour les Conférences administratives des radiocommunications. En outre, elle a amélioré et mis à jour les textes du Volume VI afin d'en accroître l'utilité pour la conception, la planification et l'exploitation des systèmes.

2. Organisation

Les Groupes de travail ont conservé la structure établie en 1978. Les domaines d'étude qui leur sont attribués sont bien délimités et bien que le volume de la documentation et le temps nécessaire à son examen varient fortement selon les Groupes, l'organisation de ces derniers n'a pas été modifiée. Tous les participants ont contribué au succès des réunions; grâce à une bonne coordination, aux efforts de coopération et à l'organisation souple du calendrier des réunions des Groupes de travail, la Commission d'études a pu mener à bien ses travaux dans les délais prévus, en fonction des ressources disponibles.

3. Groupes de travail intérimaires

Les Groupes de travail intérimaires (GTI) ont travaillé autant que possible par correspondance, mais certains ont dû tenir des réunions pour pouvoir prendre des décisions dans les délais prévus pour les documents de conférence. En outre, chaque GTI a tenu, pour faire le point de ses travaux, une brève réunion pendant la réunion intérimaire de la Commission d'études en 1983.

3.1 *GTI 6/1* (Décision 6-3, 1982; Décision 6-4, 1983)
(Président: M. P. A. Bradley, Royaume-Uni)

Ce GTI a poursuivi l'étude des méthodes d'estimation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences supérieures à 1,6 MHz. Il a tenu compte de la méthode proposée par le GTI 6/12 pour la radiodiffusion à ondes décamétriques et accordé la priorité, pour la suite de ses travaux, à l'élaboration de méthodes de prévision convenant à l'utilisation de micro-ordinateurs. (Voir le nouveau Programme d'études 30C/6 et le Rapport 1013.) Il a, à cet égard, demandé à d'autres Commissions d'études des précisions à propos des objectifs prioritaires, en matière de précision et de complexité, pour ces méthodes simplifiées.

La Recommandation COM5/1 de la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (CAMR) pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion demande au CCIR de fournir des données permettant d'améliorer certaines constantes et procédures figurant dans le Rapport de cette conférence. A cette fin, les administrations ont été invitées, en 1983, à présenter des données de champ correctement analysées et calibrées et le GTI 6/1 a tenu une réunion spéciale au début de 1985 afin d'établir une nouvelle base de données de mesure (base de données C) qu'utilisera le GTI 6/13 pour étudier les améliorations possibles.

3.2 *GTI 6/2* (Décision 21-2)
(Président: M. A. D. Spaulding, Etats-Unis d'Amérique)

A la suite d'une longue période d'études et de préparation, une révision importante du Rapport 322-2, Caractéristiques des bruits atmosphériques et applications, a été présentée à la réunion finale. Ce travail considérable a été approuvé par la Commission d'études. Malheureusement, le calendrier n'a pas permis aux participants d'examiner en détail les puissances de bruit indiquées sur les nouvelles cartes pour différentes zones géographiques. Dans ces conditions, les Administrations du Brésil, de la République populaire de Chine et de l'Inde ont réservé leur position au sujet de ce Rapport.

Comme il est peu probable que ce sujet fasse l'objet d'un important programme de travail dans un proche avenir, le GTI 6/2 a été dissous.

3.3 *GTI 6/4* (Décision 57, 1983)
(Président: M. J. C. H. Wang, Etats-Unis d'Amérique)

La Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2) (Rio de Janeiro, 1981) a invité le CCIR à procéder aux études techniques propres à assurer une planification satisfaisante dans la bande 1605-1705 kHz pour la première session de la Conférence administrative régionale chargée de la préparation d'un plan de radiodiffusion dans cette bande (BC-R2(1)). Le GTI 6/4, qui a été reconstitué à cette fin lors de la réunion intérimaire de la Commission d'études, a surtout travaillé par correspondance et il a tenu une réunion à Lima en 1985.

Afin de respecter le calendrier prévu pour les documents destinés à la BC-R2(1) d'avril 1986, le GTI a terminé ses travaux en mai 1985 et soumis son rapport à la Commission d'études pour approbation, exceptionnellement par correspondance. Ce rapport a été approuvé et transmis officiellement par le Directeur au Secrétaire général en août 1985.

De nouvelles précisions continuent d'être reçues à propos des valeurs de champ en ondes hectométriques dans la Région 2 et le GTI poursuit l'analyse de ces données.

3.4 *GTI 6/5* (Décision 9-3, 1982)
(Président: Dr J. Belrose, Canada)

Un GTI restreint poursuit l'étude d'un sujet particulier, à savoir la propagation de l'onde ionosphérique et la qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 500 kHz environ, plus spécialement dans la bande de fréquences inférieure à 60 kHz environ. Ce GTI a travaillé par correspondance pour examiner, améliorer et mettre à jour les Rapports pertinents.

3.5 *GTI 6/7* (Décision 10-4, 1982)
(Président: Dr L. F. McNamara, Australie)

Depuis 1978, la Section 6K du Volume, qui traite des problèmes d'exploitation, s'est considérablement développée et contient des informations mises à jour sur les méthodes de prévision à court terme, sur l'évaluation des voies en temps réel, etc. Ces résultats ont été obtenus essentiellement grâce aux travaux du GTI. Ces travaux ont été menés très activement par correspondance.

3.6 *GTI 6/8* (Décision 11-3, 1982; Décision 11-4, 1983)
(Président: Dr A. Giraldez, Argentine)

Le GTI 6/8 a continué de développer et d'améliorer la Recommandation 534 relative à la méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la Région E et son Rapport connexe sur la propagation en ondes métriques. Il a notamment tenu compte de la nécessité de fournir des informations à deux CARR: celle qui est chargée de réexaminer et de réviser les dispositions des Actes finals de la Conférence africaine de radiodiffusion en ondes métriques et décimétriques et celle qui est chargée de définir les critères de partage pour l'utilisation des bandes des ondes métriques et décimétriques attribuées aux services fixe, de radiodiffusion et mobile dans la Région 3; le mandat du GTI a été étendu, à la réunion intérimaire, aux mécanismes de propagation ionosphérique dans la bande d'ondes métriques autres que par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la couche E. Pendant la période d'études, de nouvelles données expérimentales ont été acquises, y compris des données concernant la propagation par ionisation sporadique de la couche E en Afrique et un rapport à l'intention de la Conférence régionale africaine a été élaboré à la réunion finale sur la base des travaux du GTI. Celui-ci cherche actuellement à obtenir d'autres données pour étudier les caractéristiques pour la Région 3.

3.7 *GTI 6/12* (Décision 36-1, 1982)
(Président: Dr D. L. Lucas, Etats-Unis d'Amérique)

Pendant la première moitié de la période d'études, le GTI a poursuivi activement, au cours de plusieurs réunions, la mise au point d'une méthode de prévision du champ pour la radiodiffusion à ondes décamétriques sur la base du Rapport 894. Il a achevé cette tâche en temps utile et adressé à la première session de la CAMR pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion, HFBC(1), un rapport qui a servi de base pour la méthode de prévision de la propagation que la Conférence a adoptée.

Ses travaux étant terminés, le GTI a été dissous à la réunion intérimaire de la Commission d'études.

3.8 *GTI 6/13* (Lettre du Directeur du CCIR, G.6/1686 du 19 décembre 1984)
(Président: Dr Th. Damboldt, République fédérale d'Allemagne)

A la première session de la CAMR HFBC, une version modifiée de la méthode de prévision de la propagation proposée par le CCIR a été adoptée et comme indiqué plus haut à propos du GTI 6/1, il a été demandé d'envisager d'améliorer cette méthode. Le GTI 6/13 a tenu une réunion, au cours de laquelle il a utilisé la base de données établie par le GTI 6/1 et un programme informatique fourni par l'IFRB. Il a proposé de modifier deux constantes utilisées dans la méthode, mais a indiqué qu'aucune modification ne doit être apportée à la procédure d'interpolation pour des distances comprises entre 7000 et 9000 km.

Ses travaux étant terminés, le GTI a été dissous à la réunion finale de la Commission d'études.

4. Activités des Groupes de travail lors des réunions de la Commission d'études

Comme indiqué plus haut, la répartition des tâches entre les divers Groupes de travail a été maintenue. La Commission d'études a heureusement pu bénéficier de la participation compétente et efficace des mêmes Présidents de Groupe de travail pendant sa réunion intérimaire et sa réunion finale.

4.1 *Groupe de travail 6J – Propriétés de l'ionosphère et propagation*
(Président: Dr C. M. Rush, Etats-Unis d'Amérique)

Ce Groupe a revu et actualisé sa documentation de base, son but restant l'inclusion dans les textes pertinents de renseignements décrivant de manière concise et compréhensible les mécanismes de propagation dans l'ionosphère et ses applications. Il a étudié plus particulièrement la question des indices solaires et ionosphériques, et ses travaux récents l'ont conduit à proposer de modifier la Recommandation 371 pour y faire figurer le nouvel indice ionosphérique *IG*.

4.2 *Groupe de travail 6K – Problèmes d'exploitation*
(Président: Dr D. G. Cole, Australie)

Les travaux du GTI 6/7 ont été très utiles pour cette section. Au cours des deux derniers cycles de travaux du CCIR, la documentation disponible concernant les problèmes d'exploitation a sensiblement augmenté et cette section fournit désormais des précisions utiles pour l'application des données ionosphériques et des données connexes à l'exploitation des circuits.

4.3 *Groupe de travail 6L – Facteurs affectant la conception des systèmes*
(Président: Dr Th. Damboldt, République fédérale d'Allemagne)

Cet important sujet, qui concerne l'utilisation des données ionosphériques pour la conception de systèmes, a également fait l'objet récemment de nombreux travaux. Cette section comprend des textes qui décrivent la dispersion et l'affaiblissement des signaux et qui étudient différents moyens pour évaluer la fiabilité d'un circuit en présence de variations dans le milieu de propagation dans l'ionosphère.

4.4 *Groupe de travail 6M – Bruit radioélectrique naturel et artificiel*
(Président: Dr M. Zamanian, République islamique d'Iran)

Des données sur le bruit radioélectrique sont indispensables pour la conception de tous les systèmes et les Rapports de cette section sont largement utilisés. Comme indiqué au titre du GTI 6/2, le Rapport 322 a fait l'objet d'une révision importante qui a été approuvée, moyennant des réserves, à la réunion finale.

4.5 *Groupe de travail 6N – Champ de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 1,6 MHz*
(Président: M. I. E. Davey, Royaume-Uni)

Ce Groupe a eu beaucoup à faire lors de ses dernières réunions, car il a dû examiner un grand nombre de documents soumis par les GTI 6/1, 6/8, 6/12 et 6/13 et préparer des documents de conférence. Ainsi, la mise au point des méthodes de prévision du champ a beaucoup progressé pour les bandes d'ondes décamétriques et métriques et de nouveaux programmes d'études importants ont été préparés.

La Recommandation 621 a été approuvée; ce texte, qui repose sur les travaux du GTI 6/13, contient les renseignements demandés à la première session de la CAMR HFBC.

4.6 *Groupe de travail 6P – Champ de l'onde ionosphérique aux fréquences inférieures à 1,6 MHz*
(Président: M. D. Ross, Canada)

A la réunion intérimaire, ce Groupe a élaboré le projet de Rapport AC/6 contenant des courbes de propagation destinées aux CARR de 1985 pour le service mobile maritime et le service de radionavigation aéronautique dans la Région 1 et pour la planification des fréquences dans les bandes kilométriques et hectométriques utilisées par les radiophares maritimes dans la Zone maritime européenne. Ce Rapport a été communiqué à la Commission d'études 8 et examiné pendant ces Conférences; n'ayant plus d'objet après ces Conférences, il a été supprimé à la réunion finale et ne figure plus dans la documentation actuelle.

Le Groupe a revu et actualisé les textes concernant le champ aux fréquences inférieures à 1,6 MHz environ en tenant compte des contributions des GTI 6/4 et 6/5 et des travaux liés à leurs activités.

4.7 *Groupe de rédaction*
(Président: Mlle G. Pillet, France)

Le Groupe de rédaction a eu une tâche difficile en raison du peu de temps dont il a disposé et il a dû travailler pendant trois jours après la réunion finale. Néanmoins, par son examen attentif des textes et en particulier par la solution qu'il a apportée aux problèmes d'harmonisation des textes dans les trois langues de travail, le Groupe de rédaction a grandement contribué à conserver aux textes de la Commission d'études un niveau de qualité élevé.

Mlle Pillet et M. Ross restent Rapporteurs spéciaux de la Commission d'études 6 auprès de la CMV.

5. Préparation des Conférences administratives des radiocommunications

Comme indiqué ci-dessus, la Commission d'études a entrepris d'élaborer des textes destinés aux Conférences administratives des radiocommunications.

En résumé, ces travaux ont concerné les Groupes suivants:

- radiodiffusion en ondes décamétriques: GTI 6/1, 6/12, 6/13 et GT 6N
- radiodiffusion en ondes hectométriques dans la Région 2: GTI 6/4 et GT 6P
- services mobiles maritime et aéronautique dans la Région 1: GT 6P
- radiodiffusion en ondes métriques en Afrique: GTI 6/8 et GT 6N
- critères de partage des fréquences en ondes métriques dans la Région 3: GTI 6/8 et GT 6N.

La description de ces travaux est faite aux § 3 et 4, sous les rubriques correspondant aux différents GTI et Groupes de travail.

6. Travaux futurs

Le développement des connaissances sur l'ionosphère et les nouvelles données expérimentales permettront d'améliorer et de préciser à l'avenir les textes et les méthodes de prévision.

Il faudra continuer de s'efforcer de rendre plus précises les méthodes de prévision et d'en faciliter l'application pratique aux différents cas. Il sera donc nécessaire, en particulier, de définir de nouveaux ensembles de données, concernant surtout le champ pour les ondes décamétriques et de tirer parti des possibilités qu'offrent les micro-ordinateurs.

La propagation des ondes métriques dans la Région 3 exige un complément d'étude. En effet, c'est la seule Région qui donne lieu à de longs trajets est-ouest aux basses latitudes et, pour cette raison, les caractéristiques de l'ionosphère équatoriale présentent sans doute une importance particulière.

S'agissant des ondes hectométriques, les travaux continueront notamment dans la Région 2, l'accent devant être, ici aussi, mis sur les caractéristiques aux latitudes faibles et équatoriales.

Pour que les procédures et les techniques décrites dans divers Rapports et Recommandations soient plus utiles, la Commission d'études a estimé nécessaire d'élaborer des programmes informatiques. Elle a précisé, dans la Résolution 63, les méthodes qui sont déjà disponibles sous forme de programmes auprès du Directeur du CCIR, ainsi que les cas pour lesquels des programmes sont encore nécessaires. Un travail complémentaire est nécessaire pour informatiser toutes les méthodes mentionnées dans cette Résolution.

Il faut noter que la majorité des demandes d'amélioration des procédures à toutes les fréquences, des ondes hectométriques aux ondes métriques, proviennent d'administrations de pays situés à de faibles latitudes, en particulier dans l'hémisphère sud. C'est donc sur cette région que la Commission d'études devra concentrer ses efforts, compte tenu des limitations dues aux données expérimentales disponibles.

Pour répondre à la demande croissante de radiocommunications et de services plus fiables, il importe que la Commission d'études établisse, et publie dans l'intérêt des usagers, des spécifications plus détaillées des caractéristiques de l'ionosphère.

SECTION 6J: CARACTÉRISTIQUES DE L'IONOSPHÈRE ET PROPAGATION

Recommandations et Rapports

RAPPORT 725-2

LES PROPRIÉTÉS DE L'IONOSPHÈRE

(Question 25/6)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

L'ionosphère est la région ionisée de l'atmosphère terrestre qui s'étend environ de 50 à 2000 km au-dessus de la surface de la Terre. Pour des motifs qui tiennent au développement historique des recherches sur l'ionosphère, on a l'habitude de diviser celle-ci en trois régions, encore appelées couches, que l'on désigne par les lettres D, E, et F, par ordre croissant d'altitude (voir la Fig. 1). Dans certaines conditions, on est amené à distinguer des subdivisions des couches de l'ionosphère, par exemple les couches F1 et F2. Pour ce qui est de la propagation des ondes décamétriques, les couches E et F jouent surtout le rôle de réflecteurs, permettant ainsi des transmissions entre des points de la Terre éloignés les uns des autres. La région D est essentiellement un milieu absorbant qui provoque un affaiblissement des ondes décamétriques, cependant les ondes myriamétriques et plus longues sont réfléchies à des altitudes situées dans la région D. La transition entre la réflexion aux altitudes de la région D et de la région E se produit dans la gamme des ondes hectométriques. L'ionosphère joue aussi un rôle important dans les télécommunications spatiales en ondes métriques et plus courtes car les signaux subissent des déformations et des dégradations variables lors de la traversée de l'ionosphère.

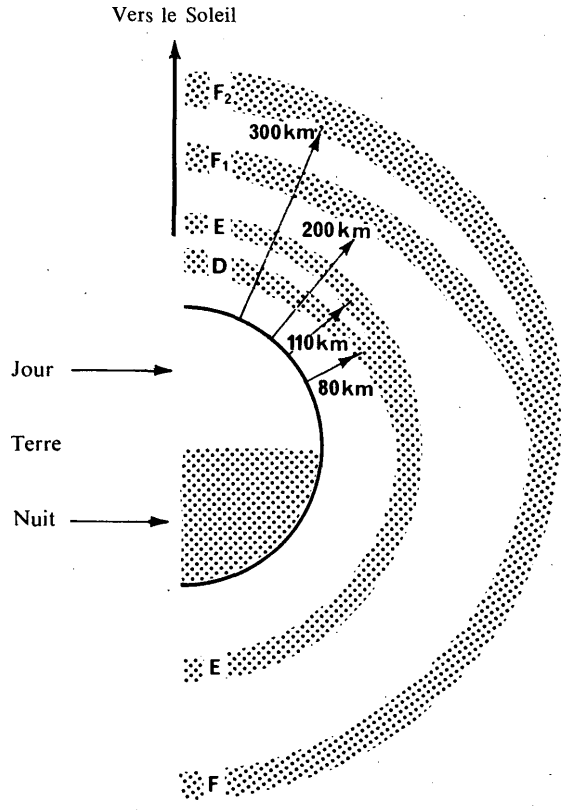


FIGURE 1 – *Les régions de l'ionosphère selon l'altitude*

2. Formation de l'ionosphère

La principale source d'ionisation dans l'ionosphère est le rayonnement électromagnétique du Soleil dans la partie du spectre couvrant l'ultra-violet et les rayons X. Les particules énergétiques chargées d'origine solaire et d'origine magnétosphérique ainsi que les rayons cosmiques d'origine galactique sont d'autres sources importantes d'ionisation. Le taux de production d'ionisation aux diverses altitudes dépend de l'intensité du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde ainsi que son efficacité à ioniser les gaz neutres de l'atmosphère. Le rayonnement solaire étant progressivement absorbé à mesure qu'il traverse l'atmosphère, son pouvoir ionisant résiduel dépend de la longueur de son trajet dans l'atmosphère et, par conséquent, de la distance zénithale (χ) du Soleil. Le taux de production d'ionisation est maximal quand le Soleil est au zénith ($\chi = 0$) mais la densité d'ionisation présente des variations géographiques, diurnes et saisonnières.

La production d'ions libres par le rayonnement solaire et par les particules chargées est contrebalancée par des processus qui font diminuer l'ionisation, notamment par la recombinaison d'électrons et d'ions positifs à la suite de chocs, et par attachement d'électrons à des atomes ou des molécules de gaz neutres. On peut, à partir de principes physiques, établir un modèle mathématique, assez conforme à la réalité, de la répartition de l'ionisation en fonction de l'altitude; on se fonde à cet effet sur des estimations du flux solaire ionisant, sur la distribution verticale des constituants neutres de l'atmosphère et de leur capacité d'absorption, enfin sur la distance zénithale du Soleil. Ce travail a été fait pour la première fois par Chapman [1931] pour le cas d'un constituant unique et d'une atmosphère isotherme ionisée par un rayonnement solaire monochromatique. Cette approximation semble assez valable lorsqu'il s'agit d'expliquer la formation des couches E et F1, mais elle ne s'applique que médiocrement aux couches D et F2.

Dans la partie inférieure de l'ionosphère, en dessous de 65 km d'altitude environ, l'ionisation est due avant tout aux rayons cosmiques d'origine galactique. A ces altitudes, la variation de la densité électronique ne dépend donc pas essentiellement de la distance zénithale du Soleil.

3. La région D

La région D s'étend approximativement de 50 à 90 km, avec une concentration électronique qui croît rapidement avec l'altitude. La concentration électronique présente, dans la région D, une variation diurne importante; elle passe par un maximum peu après le midi solaire local et ses valeurs de nuit sont faibles. Cette variation diurne présente l'amplitude la plus grande dans la tranche d'altitude de 70 à 90 km; à midi la concentration électronique y est généralement de l'ordre de 10^8 à 10^9 électrons par m^3. La concentration électronique de la région D présente en outre une variation saisonnière très nette, avec un maximum en été. En hiver, bien que la distance zénithale du Soleil soit très grande, on observe souvent une concentration électronique anormalement élevée dans la tranche d'altitude de 70 à 90 km, ce qui résulte probablement de modifications dans la composition de l'atmosphère neutre. L'influence de l'activité solaire sur la concentration électronique de la région D n'est pas la même aux différentes altitudes: entre 70 et 90 km, les rayons X d'origine solaire sont la principale source d'ionisation et cette dernière est maximale au maximum du cycle solaire; au-dessous de 70 km, l'élément dominant est le rayonnement cosmique, la concentration maximale se présente lorsque l'activité solaire est minimale, car la diffusion interplanétaire des rayons cosmiques d'origine galactique est alors réduite. Pendant les jours non perturbés qui suivent un orage géomagnétique et qui sont associés à sa phase de récupération, la densité électronique entre 75 et 90 km se trouve renforcée aux latitudes subaurorales et moyennes ($L = 4{,}5 - 2{,}0$) en raison de la précipitation d'électrons énergétiques à partir de la ceinture extérieure de rayonnement [Larsen et autres, 1976; Wagner et autres, 1982a et b].

4. La région E

La tranche d'altitude comprise entre 90 et 130 km constitue la région E, qui comprend ce que l'on appelle la couche E «normale» et la couche E «sporadique». La couche E normale est une couche régulière, très conforme au modèle de Chapman; sa concentration électronique dépend étroitement de la distance zénithale du Soleil; elle présente un maximum journalier vers midi, et un maximum saisonnier en été. C'est aux environs de 110 km que cette concentration électronique est maximale, approximativement 10^{11} électrons par m^3, ce qui correspond à une fréquence de plasma de l'ordre de 3 MHz. La nuit, l'ionisation résiduelle de la région E est faible; sa fréquence de plasma est de l'ordre de 0,4 à 0,6 MHz [Wakai, 1971]. La concentration électronique est maximale au maximum du cycle solaire; en un lieu donné, la fréquence de plasma de la couche E diurne varie d'environ 30% sur la durée d'un cycle solaire. La couche E sporadique sera étudiée ci-dessous, au § 8.1.

5. La région F

La région F commence à une altitude d'environ 130 km. Sa partie inférieure et sa partie supérieure se comportent de façon différente, de sorte que l'on a été amené à la subdiviser en deux couches, la couche F1 et la couche F2, bien que le profil vertical de la concentration électronique ne présente pas de stratification bien nette.

La couche F1 est la région comprise entre 130 et 210 km d'altitude, la concentration électronique maximale y est d'environ 2×10^{11} électrons par m^3. Comme la couche E, la couche F1 suit approximativement le modèle de Chapman, mais l'influence de la distance zénithale du Soleil n'y est pas la même. La distinction entre les couches F1 et F2 ne se maintient pas la nuit.

La couche F2, la plus haute des couches ionosphériques, est celle dont la concentration électronique est généralement la plus forte; ses valeurs sont comprises entre 10^{12} électrons par m^3 le jour et 5×10^{10} électrons par m^3 la nuit. La couche F2 se prête mal à une représentation par le modèle de Chapman car elle est fortement influencée par les vents, la diffusion et divers autres effets dynamiques. Dans les premiers temps de la recherche ionosphérique, on pensait que le modèle de Chapman s'appliquait aussi à la couche F2, et les écarts par rapport au comportement attendu étaient qualifiés d'«anomalies»; on sait aujourd'hui que ce terme est impropre.

L'«anomalie diurne» consiste en ce que le maximum de la concentration électronique de la couche F2 se produit souvent à une heure autre que le midi solaire, en général entre 13 et 15 heures locales. De plus, ce maximum de concentration présente une variation semi-diurne dont les maxima ont lieu autour de 10 à 11 heures locales et de 22 à 23 heures locales [Matuura, 1980]. L'«anomalie saisonnière» consiste en une tendance de la concentration électronique de la couche F2 à midi à être plus élevée en hiver qu'en été. Cette anomalie est représentée essentiellement par la composante de période 24 heures de la variation diurne dont le maximum a lieu vers 12 heures locales dans l'hémisphère d'hiver. L'«anomalie équatoriale» consiste en ce que, dans une zone située entre 20 et 30° de part et d'autre de l'équateur géomagnétique, l'influence de la distance zénithale du Soleil sur la concentration électronique de la couche F2 est notablement différente de ce qu'elle est ailleurs. Dans les régions polaires, on observe un certain nombre d'«anomalies» des caractéristiques de la couche F2, dont on associe maintenant quelques-unes à des précipitations de particules chargées. La plus remarquable de ces anomalies est probablement le «creux» de la région F, dépression prononcée de la concentration électronique de la couche F2 s'étendant sur quelques 2 à 10° (200 à 1000 km) en direction de l'équateur, depuis l'ovale auroral, du côté de la Terre qui se trouve dans la nuit.

La concentration électronique à des altitudes supérieures au niveau de concentration électronique maximale, a été déterminée par des observations de diffusion incohérente, par des fusées et par des sondeurs installés à bord de satellites. Aux altitudes supérieures à celle de son maximum, la concentration électronique décroît de façon exponentielle avec l'altitude. Vers 1000 km, son gradient change, ce qui est probablement dû à une modification de la composition de l'atmosphère. L'altitude à laquelle a lieu cette transition augmente avec la latitude. A 1000 km, la concentration électronique est normalement de l'ordre de 10^9 à 10^{10} électrons par m^3; à 5000 km, elle est de l'ordre de 10^9 électrons par m^3.

Les observations faites en contre-haut au moyen de sondeurs embarqués à bord de satellites ont permis d'établir une morphologie mondiale de la concentration électronique dans la haute ionosphère, laquelle a révélé, par exemple, que l'anomalie équatoriale peut s'étendre en altitude bien au-delà de 500 km. De plus, des mesures faites à bord de satellites ont montré que le creux de concentration électronique de la région F aux latitudes élevées dans l'ionosphère de nuit est une caractéristique prédominante de la partie supérieure de l'ionosphère. La concentration électronique dans le creux peut être 10 fois plus faible qu'au niveau où elle atteint son maximum.

Les caractéristiques particulières de la région F au voisinage de l'équateur et aux latitudes élevées, qui ont des effets importants sur la propagation des ondes radioélectriques, sont étudiées ci-dessous.

5.1 *Région F équatoriale*

D'après des observations faites à terre et à partir de satellites, on sait que l'ionisation de la couche F présente de forts gradients latitudinaux aux basses latitudes, et que la forme de la distribution transéquatoriale de foF2 change nettement avec l'heure locale [Awe, 1973]. Au lever du Soleil, l'ionisation présente un maximum unique au voisinage de l'équateur magnétique. Peu après, la distribution latitudinale de l'ionisation change brusquement et présente deux crêtes séparées par un creux de 2 à 5 ° de largeur, centré sur l'équateur magnétique [Vila, 1971a; Walker et Chan 1976]. Vers la fin de la matinée, la distance entre les crêtes augmente en même temps que leur densité d'ionisation [Rastogi, 1959; Croom et autres, 1960; Lyon et Thomas, 1963; Rao et Malhotra, 1964]. La crête nord est plus éloignée de l'équateur magnétique que la crête sud, sauf au solstice de décembre; de plus au solstice de juin, la crête nord peut atteindre son extension maximale en latitude plusieurs heures plus tôt que la crête sud [Sharma et Hewens, 1976]. L'heure à laquelle les crêtes sont le plus éloignées de l'équateur magnétique varie avec l'activité solaire: au début de l'après-midi pendant les périodes d'activité solaire minimum et au début de la soirée pendant les périodes d'activité solaire maximum [Rush et autres, 1969]. Ensuite, les crêtes se déplacent en direction de l'équateur pour se réunir en formant un seul maximum d'ionisation au-dessus de l'équateur.

Il est maintenant bien établi que la formation des crêtes s'explique par un mécanisme de «fontaine équatoriale» lié à la dérive de Hall, qui est dirigée vers le haut lorsque le champ électrique de l'électrojet équatorial est dirigé vers l'est.

Le moment où l'anomalie débute, celui où elle diminue et celui où elle passe par son développement maximal varient beaucoup d'un jour à l'autre [Vila, 1971b; Rush et Miller, 1972]. Il peut y avoir des différences notables entre des distributions en latitude de foF2 observées un jour donné à la même heure locale, même si l'écart en longitude ne dépasse pas 30°. Dans certains endroits, le comportement observé est très proche de la prévision du CCIR obtenue à partir du Rapport 340; en d'autres endroits, les fréquences critiques observées aux crêtes de l'anomalie ainsi que les gradients d'ionisation sont beaucoup plus élevés que ceux qui ont été prévus.

La variation en latitude de foF2 de part et d'autre de l'équateur est souvent asymétrique, c'est-à-dire que les fréquences critiques aux deux crêtes sont nettement différentes [Lyon et Thomas, 1963]. Cette asymétrie semble due à des vents thermosphériques soufflant de la latitude subsolaire vers l'équateur [Bramley et Young, 1968]; en général, la crête la plus éloignée de cette latitude est la plus prononcée des deux. Dans l'ionosphère supérieure, la situation est inversée et la crête de l'anomalie est plus prononcée dans l'hémisphère d'été [Rush et autres, 1969].

La Fig. 2 montre un exemple de structure de l'ionosphère supérieure lorsque l'anomalie existe, ainsi que les variations en latitude correspondantes de NmF2 et hmF2. On voit que les crêtes de l'anomalie se produisent lorsqu'une «arche» d'ionisation renforcée suivant les lignes de force du champ magnétique coupe le niveau d'ionisation maximale de la couche: cette «arche» s'étend dans la partie supérieure de l'ionosphère jusqu'à des altitudes de l'ordre de 1000 km. L'altitude de l'ionisation maximale de la couche est la plus élevée (environ 400 km) au-dessus de l'équateur magnétique et elle diminue rapidement de part et d'autre jusqu'à 300 km environ, au voisinage des crêtes. Au cours de la formation de l'anomalie, l'arche d'ionisation renforcée atteint des lignes de champ magnétique d'altitude croissante; son sommet s'élève et les crêtes s'éloignent de l'équateur. Pendant la phase de disparition, on pense [Eccles et King, 1969] que le sommet de l'arche diminue d'altitude et que les crêtes régressent vers l'équateur. L'heure à laquelle l'anomalie se développe et décroît dans divers secteurs de longitude varie notablement et n'est pas définitivement établie [King et autres, 1964; Lockwood et Nelms, 1964]. Le facteur d'anomalie équatoriale (c'est-à-dire le rapport de la foF2 moyenne aux deux crêtes situées l'une au nord et l'autre au sud de l'équateur magnétique à la foF2 à l'équateur) présente une variation diurne fonction de la longitude qui se manifeste sous la forme d'une différence entre l'hémisphère Est (60° E-150° W) et l'hémisphère Ouest (120° W-30° E) [Matuura, 1980].

Les jours magnétiquement perturbés, les crêtes de l'anomalie sont généralement plus proches de l'équateur magnétique et l'anomalie est moins bien développée que les jours calmes. Si l'indice magnétique planétaire $K_p \geqslant 5_0$, l'anomalie disparaît [King et autres, 1967; Sharma et Hewens, 1976].

5.2 *Région F aux hautes latitudes*

Des caractéristiques notables de l'ionosphère aux latitudes moyennes et hautes sont: une région de faible concentration électronique dans la zone polaire [Timleck et Nelms, 1969; Nelms et Chapman, 1970] ainsi qu'un «creux ionosphérique», qui est une région de dépression de la concentration électronique [Muldrew, 1965, 1983; Dudeney et autres, 1983]. Le creux (Fig. 3) se présente tout d'abord dans l'après-midi, à des latitudes magnétiques élevées (70° environ), et ne s'étend alors que sur quelques degrés. A une heure plus tardive (heure locale), il se déplace graduellement jusqu'à environ 57° de latitude magnétique (pour un K_p peu élevé) au voisinage de minuit (heure locale); il s'étend alors sur environ 10° ou plus. Il peut glisser de quelques degrés en direction du pôle et disparaître peu avant le lever du Soleil. Du côté de l'équateur, le creux tend à présenter une diminution de la densité en fonction de la latitude (la densité étant divisée par 10, ou plus), en fin d'après-midi et au début de la soirée; la diminution est plus progressive pendant le reste de la nuit. Le creux présente une diminution plus marquée en fonction de la latitude en direction du pôle, à toutes les heures locales [Bates et autres, 1973].

Sur le bord équatorial du creux, le plasma suit la rotation de la Terre pendant toute la soirée. Au voisinage de minuit ou un peu plus tard, son mouvement change de sens et il s'écoule vers l'ouest, sous l'effet de la convection magnétosphérique. Ce plasma reste du côté de la face non éclairée de la Terre pendant une période prolongée qui disparaît par recombinaison [Knudsen, 1974; Spiro et autres, 1978]. Selon Rycroft et Thomas [1970], le centre du creux se déplace en direction de l'équateur d'environ 1,8° ± 0,4° par unité d'augmentation de K_p.

Une concentration électronique renforcée (presque dix fois plus grande que dans le creux) s'observe parfois du côté jour, immédiatement au-delà de la latitude magnétique 75° dans la direction du pôle. Cette augmentation est adjacente, côté pôle, à la région où les lignes de force du champ magnétique sont fermées [Whitteker, 1976]. Cette région d'ionisation maximale est représentée sur la Fig. 3 et porte le nom d'«anneau de plasma». La région intérieure à cet anneau située au voisinage immédiat du pôle magnétique, a une concentration électronique faible et on l'appelle parfois «cavité polaire».

Hunsucker [1979] a donné un résumé des résultats obtenus pendant plusieurs années d'études sur les phénomènes se produisant à haute latitude dans la région F et sur la morphologie de cette région.

6. Fréquences de collisions des électrons

Les collisions entre électrons et particules neutres revêtent une grande importance pour certains aspects de la propagation radioélectrique, en particulier en raison de leur rôle dans l'affaiblissement des ondes radioélectriques. Il est possible d'évaluer le profil fréquence de collision/hauteur dans la région D, qui est la région où la fréquence de collision des électrons est élevée ($\simeq 2 \times 10^6$ s^{-1} à 75 km), à partir d'études réalisées en laboratoire sur la mobilité des électrons dans les gaz atmosphériques [Smith, 1967] et, à partir parallèlement des valeurs obtenues pour la température et la densité (ou pression) atmosphérique au moyen d'appareils de mesures embarqués sur des fusées; une autre méthode d'évaluation tout à fait indépendante est fondée sur l'analyse de données relatives à la propagation des ondes radioélectriques [Belrose et Bourne, 1967; Thrane, 1968; Smith, 1967]. Il ressort nettement aussi bien des données relatives à la propagation radioélectrique que des données sur la pression, que la fréquence de collision dans la région D varie en fonction de la saison, de la latitude, et, en certaines occasions, de l'activité solaire. La variabilité d'un jour à l'autre est particulièrement marquée aux hautes latitudes en hiver.

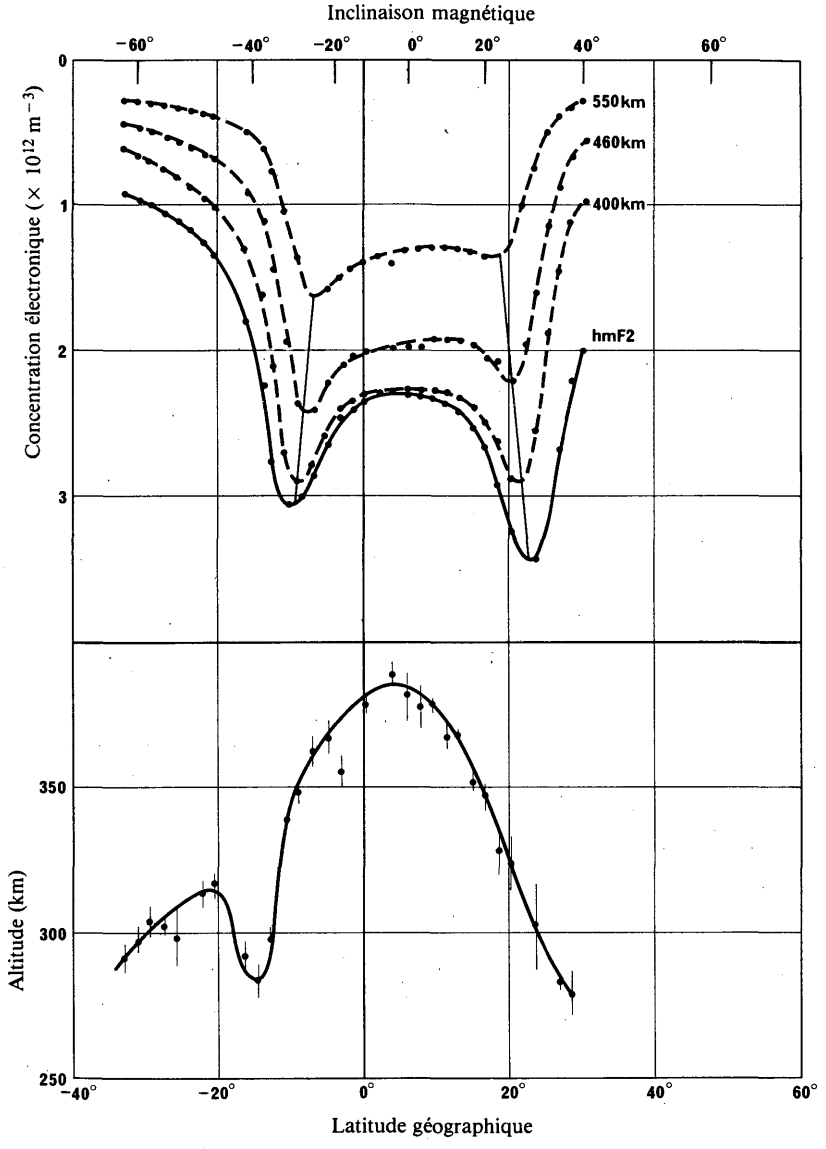


FIGURE 2 – *Données provenant des ionogrammes enregistrés par ISIS-1 le 27 octobre 1969, à 160° de longitude Est, à 15 h 05 (heure locale)*

Partie supérieure: variations en latitude de NmF2 (courbe en trait plein) et concentration électronique pour quelques altitudes de l'ionosphère supérieure (courbes en tirets). Les deux droites relient les points se trouvant sur une même ligne de force du champ magnétique terrestre.

Partie inférieure: variation correspondante de hmF2.

Dans les régions E et F, on observe une augmentation importante des collisions avec des ions; de plus, la température des électrons et celle des gaz dans la région F peuvent être différentes. Des profils fréquence de collision/hauteur obtenus pour des hauteurs comprises entre 100 et 200 km sont compatibles avec les données relatives à la propagation des ondes radioélectriques. Ces profils sont établis à partir de mesures sur plusieurs fréquences de la polarisation et de l'absorption des ondes décamétriques, les profils densité électronique/hauteur ayant été déterminés dans le cadre des mêmes expériences; on a également effectué des mesures au moyen de fusées-sondes [Biryukov et autres, 1978; Gusev et autres, 1977; Vodolazkin et autres, 1983]. Les résultats pour la période diurne indiquent une décroissance exponentielle de la fréquence de collision des électrons en fonction de la hauteur, comme cela était à prévoir compte tenu de la baisse de la pression atmosphérique, jusqu'à des altitudes d'environ 140 km. Pour les altitudes supérieures à 140 km, toutefois, la fréquence de collision augmente avec l'altitude atteignant des valeurs de 3 à 6 fois supérieures à la valeur cinétique du gaz. Par rapport à la période diurne, la fréquence efficace de collision nocturne est 6 à 7 fois plus élevée en été et 3 à 4 fois plus élevée en hiver.

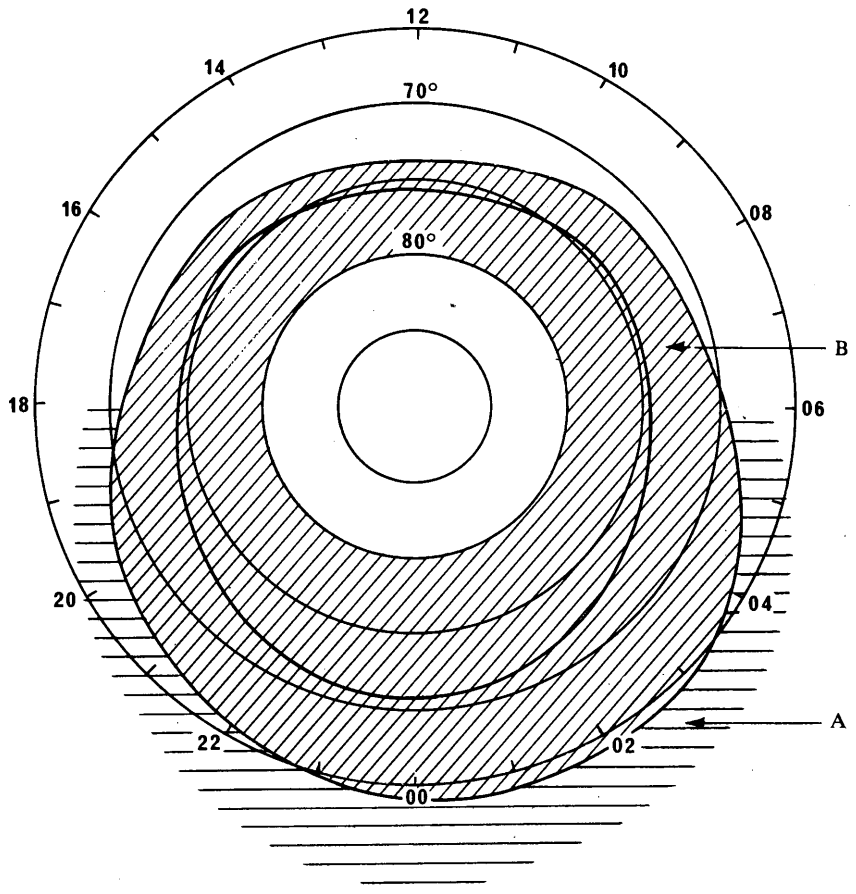


FIGURE 3 – *Schéma de la dépression et de l'anneau de plasma de la couche F en fonction de la latitude géomagnétique corrigée et du temps local magnétique, vu du pôle géomagnétique*

A: dépression de la couche F
B: anneau de plasma de la couche F

7. Contenu électronique total

Un paramètre de la distribution de l'ionisation qui présente un grand intérêt pour la détermination des effets de la propagation transionosphérique est l'intégrale $\int N ds$, que l'on appelle «contenu électronique intégré» ou «contenu électronique total» (CET) le long du trajet qui relie l'émetteur au récepteur. Lorsqu'on parle du CET sans autre précision, on désigne le contenu en électrons d'une colonne verticale de section droite égale à l'unité, alors que, dans les applications pratiques, c'est généralement du contenu le long d'un trajet oblique dont on a besoin; par conséquent il importe de toujours bien préciser s'il s'agit des valeurs d'une colonne verticale ou d'une colonne oblique. Ces deux valeurs sont entre elles dans un rapport dont on admet souvent qu'il est simplement égal à la sécante de la distance zénithale du trajet du rayon à une altitude dans l'ionosphère voisine du maximum d'ionisation de la couche F, mais généralement un peu au-dessus de ce niveau du fait de la prépondérance de l'ionisation dans la partie supérieure de la couche.

7.1 *Mesures du CET*

Voilà plus de vingt ans que des mesures du CET ont été effectuées [Davies, 1980] en utilisant essentiellement la méthode de la rotation Faraday, sur des émissions d'ondes métriques provenant de satellites sur orbite basse (de l'ordre de 1000 km) ou de satellites géostationnaires (35 800 km). Dans la pratique, le CET à la verticale, c'est-à-dire $\int N dh$ jusqu'à l'altitude h_s du satellite, se déduit de la valeur mesurée de la rotation Faraday, Ω, au moyen de la formule:

$$\Omega = (KM/f^2) \int_0^{h_s} N \, dh \qquad (1)$$

où K est une constante, f la fréquence et M la valeur de $B_L \sec(\mathrm{ZEN})$ à l'altitude appropriée, B_L est la composante longitudinale de l'induction magnétique de la Terre et ZEN est la distance zénithale du rayon [Rishbeth et Garriott, 1969].

On a montré que, pour une très grande variété de profils ionosphériques, le CET jusqu'à une altitude de 2000 km peut se calculer à moins de 5% près moyennant l'utilisation d'une valeur de M calculée pour l'altitude de 420 km [Titheridge, 1972]. On qualifie ordinairement cette valeur du CET de «contenu ionosphérique» ou de «contenu Faraday» (N_I) pour la distinguer du CET total (N_T) jusqu'à l'altitude des satellites géostationnaires. On peut obtenir N_T par une méthode de mesure du temps de propagation de groupe d'ondes métriques [Soicher, 1976] dans laquelle le champ magnétique n'intervient pratiquement pas, de sorte que les électrons en tous les points situés le long du trajet ont un même effet. Des mesures du déphasage différentiel entre fréquences cohérentes dans la gamme des gigahertz ont été utilisées aussi à cet effet [Awaka et Fujita, 1978]; dans cette méthode, l'influence du champ géomagnétique est entièrement négligeable. La différence entre N_T et N_I est souvent appelée «contenu protonosphérique» ou «contenu plasmasphérique» (N_p). Le rapport N_p/N_I varie généralement d'environ 15% pendant le jour, à plus de 50% pendant la nuit [Soicher, 1977].

Le contenu ionosphérique N_I est en général étroitement lié à la fréquence critique foF2 de la couche F2 et il dépend beaucoup de la latitude, de l'heure locale, de la saison, du flux solaire et de l'activité géomagnétique. Aux faibles latitudes magnétiques, il présente la même anomalie équatoriale que foF2 (voir le § 5.1). La Fig. 4 représente des valeurs de N_I pour les quatre saisons de l'année 1966, année de minimum d'activité solaire [de Mendonca et autres, 1969]; le comportement de la crête sud de l'anomalie s'y voit clairement. Le contenu ionosphérique N_I est observé depuis de nombreuses années aux latitudes moyennes dans un certain nombre de stations et l'on est assez bien documenté sur son comportement. On a tracé par exemple pour une partie de l'Europe [Amayenc et autres, 1971] et pour l'Amérique du Nord [Mendillo et Klobuchar, 1975] des contours de N_I pour diverses saisons en fonction de la latitude et de l'heure locale. Les travaux de Mendillo et Klobuchar s'étendent, vers le Nord, jusqu'au-delà du creux ionosphérique de haute latitude, lequel est surtout prononcé pendant les nuits d'hiver. Hargreaves et autres [1980] ont donné une description d'autres études consacrées au CET aux latitudes élevées.

7.2 *Les modèles de CET*

Divers groupes ont essayé de faire des modèles de N_I en partant de l'une des méthodes ci-dessous:

- prévisions de N_I à partir d'un grand nombre de données en un petit nombre d'emplacements [Waldman et da Rosa, 1971] ou à partir de données de foF2 et d'un modèle d'épaisseur réduite N_I/NmF2, lui-même déduit d'études détaillées faites en quelques emplacements seulement [Klobuchar et Allen, 1970; Rao et autres, 1971];
- calcul de N_I par intégration d'un profil prévu de $N(h)$ [Bent et autres, 1975; Feen et autres, 1975; Lee et Nisbet, 1975].

La plupart de ces modèles ont été déduits, au moins en partie, de mesures faites dans l'hémisphère nord et l'on peut penser que c'est aux latitudes moyennes qu'ils s'appliquent le mieux. On a d'autre part établi, en combinant les méthodes citées ci-dessus [Klobuchar, 1975], un modèle simplifié qui devrait donner une première approximation à l'échelon mondial.

Ces modèles simples permettent de prévoir la moyenne mensuelle du CET avec une erreur (moyenne quadratique) de 20 à 25% le jour et de 30 à 35% la nuit [Dulong, 1977]. Ce n'est qu'en recourant à des modèles en temps quasi réel que l'on réussira probablement à atteindre une précision plus grande, particulièrement dans les régions dont le cas est difficile à traiter, comme celles de l'anomalie équatoriale et de la zone aurorale. D'après des études de la corrélation spatiale du CET effectuées par Klobuchar [1977], on obtient pour les valeurs diurnes du CET un coefficient de corrélation d'environ 0,7 pour des distances de 2900 km dans le sens est-ouest et de 1800 km dans le sens nord-sud.

8. Les irrégularités de l'ionosphère

Divers phénomènes physiques sont à l'origine de l'apparition, dans l'ionosphère, de structures irrégulières qui varient énormément dans le temps et dans l'espace. Selon la fréquence utilisée, la méthode d'observation et la latitude magnétique où a lieu l'observation, ces irrégularités se manifestent par toutes sortes d'effets qualitativement différents. En ce qui concerne les variations en latitude, il est commode de considérer quatre régions: la zone équatoriale, qui s'étend approximativement jusqu'à 20° de part et d'autre de l'équateur géomagnétique; la zone aurorale, qui est approximativement limitée par les parallèles 60-70° de latitude géomagnétique corrigée et qui est appelée parfois l'ovale auroral; la zone tempérée, qui occupe la gamme intermédiaire des latitudes; et la calotte polaire, qui s'étend vers chaque pôle à partir de la zone aurorale. Dans chacune de ces régions, l'intensité des irrégularités présente des variations saisonnières et diurnes bien définies.

8.1 *Ionisation sporadique de la région E*

On appelle «E sporadique» (Es) l'ionisation anormale, qui se manifeste aux altitudes de la Région E et prend des formes très diverses, parfois irrégulière et morcelée, parfois peu marquée et discoïdale, sans grande relation directe avec le rayonnement ionisant du Soleil. Cette ionisation sporadique a des propriétés fort différentes dans trois zones assez bien définies: zone équatoriale, zone de hautes latitudes et zone tempérée. Une étude à l'échelle mondiale de E sporadique a été faite par Whitehead [1970]. Des progrès plus récents sont passés en revue dans un numéro spécial de Radio Science [Matsushita et Smith, 1975].

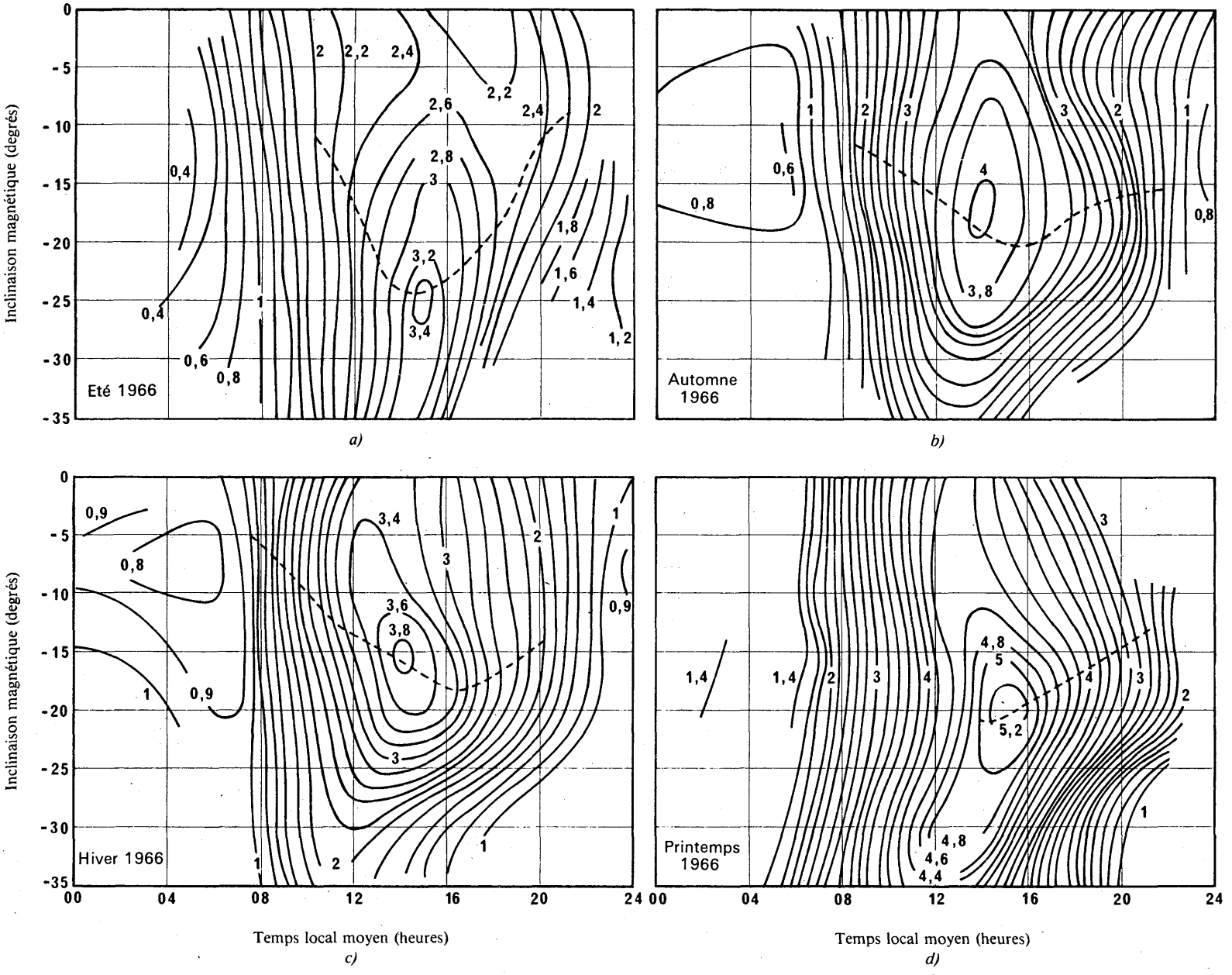


FIGURE 4 – *Exemples de contours du contenu électronique ionosphérique (N_I) aux faibles inclinaisons magnétiques. Les contours donnent les valeurs de N_I en unités 10^{17} el/m²*
[de Mendonca et autres, 1969]

8.1.1 *E sporadique dans la zone équatoriale*

Les couches «E sporadique» sont présentes pendant une grande partie de la journée mais la latitude du maximum d'occurrence varie avec la longitude (Rapport 259).

Dans une zone étroite au voisinage de l'équateur d'inclinaison magnétique, un type particulier d'ionisation E sporadique se manifeste régulièrement pendant les heures de jour [Matsushita, 1962; Knecht et McDuffie, 1962]. La largeur de cette zone est d'environ ± 6° d'inclinaison magnétique, variant légèrement selon la saison, d'environ 1° vers l'hémisphère d'été [Giraldez et autres, 1981]. Elle est donc très étroite comparée à l'anomalie équatoriale. Cette couche E sporadique «équatoriale» est observée habituellement de jour, elle est très transparente et ses fréquences extrêmes sont élevées. On observe régulièrement des valeurs de l'ordre de 10 MHz avec des ionosondes au voisinage de l'équateur magnétique. La structure des irrégularités d'ionisation E sporadique alignées suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre a été déduite par Cohen et autres [1962] d'observations faites par radar à Jicamarca au Pérou. L'origine de ces irrégularités serait associée à l'électrojet équatorial [Mayaud, 1965]. On a proposé des théories qui mettent en jeu des phénomènes d'instabilité de plasma [Farley, 1963; Waldteufel, 1965] pour rendre compte de leur formation.

8.1.2 *E sporadique aux latitudes élevées*

La morphologie et la dynamique de E sporadique aux latitudes élevées ont été décrites par Bates et Hunsucker [1974] et Hunsucker [1975].

Il existe entre les aurores visibles et l'ionisation E sporadique aurorale une relation complexe. L'altitude de cette ionisation se situe entre 90 et 130 km et sa valeur la plus courante est de 110 km. Elle se présente soit sous la forme d'une couche mince, soit sous la forme d'une couche relativement épaisse qui donne lieu à un retard notable des ondes radioélectriques, comme la couche E régulière, soit enfin sous la forme d'irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique. Les nuages d'ionisation E sporadique aurorale se déplacent souvent avec des vitesses de 200 à 3000 m/s, vers l'ouest dans la soirée et vers l'est en début de matinée, en corrélation avec les déplacements des aurores visibles.

L'ionisation E sporadique aurorale est surtout un phénomène nocturne; son maximum d'occurence se situe aux environs de 69° de latitude géomagnétique mais varie de plusieurs degrés aux cours du cycle solaire. Elle présente une corrélation nettement positive avec l'activité géomagnétique, surtout avec les commencements d'orages magnétiques à début brusque, mais ne dépend pas de façon prononcée du cycle d'activité solaire.

A l'intérieur de la calotte polaire, E sporadique présente des caractéristiques différentes de Es auroral, bien que la même instabilité du plasma entraîné par des courants soit active dans les deux régions. En général, E sporadique est notablement plus faible et offre une corrélation négative avec l'activité géomagnétique, laquelle est liée aux sous-orages auroraux. Dans la calotte polaire, E sporadique s'étend en bandes ou rubans à travers cette calotte, grossièrement dans la direction du Soleil, et peut être associée à des faibles émissions optiques d'aurores infravisibles.

8.1.3 *E sporadique dans les zones tempérées*

La densité maximale d'ionisation de la couche E sporadique aux latitudes tempérées peut souvent atteindre des valeurs plusieurs fois supérieures à celles de la région E environnante; cette ionisation sporadique se présente sous forme de «nuages» qui peuvent s'étendre de quelques kilomètres à un millier de kilomètres et dont l'épaisseur est généralement comprise entre 500 et 2000 m. L'altitude de la couche E sporadique est habituellement comprise entre 95 et 135 km; sa valeur la plus courante est de 110 km. Kerblaï et Nosova [1980] ont développé un modèle statistique pour la prévision des caractéristiques et des propriétés réfléchissantes de Es.

La couche Es de zone tempérée apparaît le plus souvent en été et pendant les heures de jour. Sa variation journalière passe par des maxima au milieu de la matinée et au coucher du Soleil, avec un certain retard par rapport aux heures où l'ionisation régulière de la couche E commence à croître ou à décroître. Sa variation saisonnière est complexe et semble liée aux vents dans la haute atmosphère; le minimum saisonnier est habituellement au milieu de l'hiver ou à l'équinoxe de printemps. Ce comportement saisonnier change brusquement à 60° de latitude géomagnétique, frontière de la zone de E sporadique auroral.

8.2 *Irrégularités de la région F*

8.2.1 *Région F équatoriale*

Les irrégularités d'ionisation de la région F ont tendance à se produire le soir, environ une heure après le coucher du Soleil, et ont des dimensions comprises entre 3 m et 10 km. Ces irrégularités semblent liées aux variations de la hauteur de la couche F au-dessus de l'équateur magnétique dans la soirée [Booker et Wells, 1938; Osborne, 1951; Wright, 1959; Lyon et autres, 1961; Aarons, 1982]. Les irrégularités sont

généralement plus étendues aux équinoxes mais ce phénomène peut varier en fonction de la longitude. La probabilité d'occurrence d'échos diffus déduite de données obtenues par des sondages en contre-haut a mis en évidence deux crêtes de nuit, l'une après le coucher du Soleil et l'autre avant le lever du Soleil dans la région de basse latitude [Maruyama et Matuura, 1980]. Muldrew [1980a] a constaté un comportement similaire la nuit. L'occurrence d'irrégularités dans la région F équatoriale semble être moindre en période de perturbation géomagnétique [Fang et Liu, 1983].

Les irrégularités tendent à être alignées le long des lignes de force du champ magnétique et leurs rapports d'axes sont de l'ordre de 20 [Cohen et Bowles, 1961; Kent et Koster, 1967]. Calvert et Schmid [1964] ont conclu, d'après des données recueillies par un sondeur en contre-haut, que non seulement certaines irrégularités particulières, mais aussi des nuages entiers d'irrégularités sont alignés le long des lignes de force du champ magnétique. Les nuages d'irrégularités couvrent parfois de vastes surfaces. Kotadia [1959] a signalé une bonne corrélation d'un jour à l'autre des échos F-diffus entre Ahmedabad, Kodaikanal et Singapour pendant les mois d'équinoxe, mais pas pendant les mois de solstice. Cohen et Bowles [1961] ont étudié le mouvement des nuages d'irrégularités en utilisant des ionogrammes successifs sous incidence verticale; ils sont parvenus à la conclusion que ces nuages s'étendent jusqu'à 1000 km dans la direction est-ouest. Des données fournies par des satellites indiquent des dimensions de nuages d'irrégularités de 100 à 2000 km dans la direction nord-sud et de 500 à 3000 km dans la direction est-ouest. Par ailleurs, des résultats de rétrodiffusion de signaux en ondes décamétriques [Clemesha, 1964] donnent des dimensions de 30 à 400 km dans la direction est-ouest avec une valeur moyenne de 100 km.

Ces premiers résultats ont été corroborés et développés lorsqu'on a pu utiliser des données provenant de mesures plus détaillées effectuées *in situ* par satellites, ainsi que des observations de scintillations effectuées à partir du sol. Ces données ont permis de constater que les irrégularités de l'ionisation de la région F varient très nettement avec la longitude, en plus des variations déjà constatées avec la latitude et dans le temps. On peut trouver à ce sujet des renseignements détaillés dans l'étude d'Aarons [1977] qui contient aussi des données sur l'effet des irrégularités équatoriales sur la qualité de fonctionnement des systèmes faisant intervenir la propagation transionosphérique.

Lockwood et Petrie [1963], utilisant des ionogrammes du du satellite Alouette-1, ont découvert que les irrégularités équatoriales s'étendent jusqu'à une hauteur de 600 à 1000 km dans l'ionosphère supérieure. Dyson et Benson [1978], utilisant des données fournies par les satellites Alouette-2 et ISIS-1, ont constaté que des ondes radioélectriques étaient guidées par des irrégularités à petite échelle (environ 1 km) alignées le long des lignes de force du champ qui existent au sein de nuages d'irrégularités à grande échelle (environ 100 km) en forme de bulles. La distribution de la densité électronique à l'intérieur des conduits n'était pas symétrique par rapport à l'équateur. Des études statistiques de ces conduits faites par Muldrew [1980a, b] ont montré que la théorie de Cole [1971] selon laquelle il y aurait échange de tubes de flux magnétique dû à des courants alignés le long des lignes de force du champ peut expliquer au mieux la formation initiale des irrégularités. Lorsque de telles régions sont traversées par une onde radioélectrique, la rotation de Faraday qu'elle subit montre des dépressions du contenu électronique. Des données expérimentales ont montré des dépressions moyennes de l'ordre de 1,5 à 3,0 $\times$ 10^{16} el/m^2. De plus, le taux d'amplitude des scintillations peut augmenter brusquement lorsque ces bulles se forment le long du trajet de propagation ou traversent celui-ci [Yeh et autres, 1979]. On a des preuves qu'il existe aussi des renforcements du contenu électronique ambiant, lesquels sont accompagnés de diminutions de la fréquence des évanouissements, de l'indice de scintillation et du niveau d'amplitude moyen du signal [Tyagi et autres, 1982]. L'apparition d'une bulle à une grande échelle peut être très localisée et les nuages d'irrégularités à grande échelle qui en résultent peuvent subsister pendant plusieurs heures [Aarons et Buchau, 1978]. Ces irrégularités sont maximales au solstice de juin aux longitudes asiatiques et au solstice de décembre aux longitudes américaines.

8.2.2 *Région F aux hautes latitudes*

La région F dans la zone aurorale présente souvent la nuit des concentrations électroniques considérablement plus faibles que celles de la région E, et presque toujours de nature irrégulière. Du côté diurne de l'ovale auroral, il existe une région qui s'étend sur plusieurs degrés de latitude, et dans laquelle on observe presque toujours une ionisation irrégulière de la couche F, d'intensité relativement élevée. Ces irrégularités résultent de l'arrivée directe du plasma du vent solaire dans l'ionosphère par la faille de la magnétosphère. Les précipitations de particules de faible énergie produisent un supplément d'ionisation irrégulière dans «l'anneau de plasma», (voir le § 5.2). Les irrégularités de la structure de l'ionosphère aux latitudes élevées sont examinées plus en détail dans le Rapport 886 et dans un numéro spécial de Radio Science [Hunsucker et Greenwald, 1983].

La concentration électronique présente souvent des gradients latitudinaux très élevés à proximité de l'ovale auroral, notamment à son bord équatorial. La fréquence maximale du plasma peut varier de 100% ou 200% sur des distances inférieures à 100 km. Ces gradients latitudinaux sont encore plus accusés dans la partie supérieure de l'ionosphère, où la limite de l'ovale auroral du côté des basses latitudes a été décrite comme un «mur» d'ionisation. Les gradients latitudinaux au bord équatorial du creux ionosphérique sont moins accusés que les gradients au bord polaire (bord équatorial de l'ovale auroral), mais ils sont néanmoins souvent beaucoup plus grands que les gradients observés aux latitudes moyennes.

9. Perturbations ionosphériques

Il arrive parfois qu'un sursaut solaire, une éruption solaire à rayons X ou plus simplement une éruption solaire donnent lieu à des densités d'ionisation anormalement élevées dans la région D. Ce phénomène ionosphérique, appelé «perturbation ionosphérique à début brusque» (en abrégé PIDB) se traduit par une brusque augmentation de l'absorption des ondes hectométriques, décamétriques et métriques (le champ des ondes myriamétriques et kilométriques peut être accru). Ces perturbations sont provoquées par l'arrivée directe en provenance du Soleil de rayons X et ultraviolets; elles ne se manifestent que sur la face éclairée de la Terre et sont très fréquentes au maximum d'activité solaire.

Les éruptions solaires sont accompagnées d'un surcroît d'émission d'ultraviolets et de rayons X mous, lequel donne lieu à une augmentation brusque du CET de l'ionosphère (en anglais: SITEC = sudden increase in the total electron content). Cette brusque augmentation du CET se manifeste dans les minutes qui suivent l'éruption optique et N_I subit alors une augmentation de 5 à 30% [Mendillo et autres, 1974]. Le retour à la normale peut se produire dans un délai de 10 à 30 minutes, mais il peut aussi arriver tout simplement que N_I reste supérieur à sa valeur normale pendant les quelques heures qui suivent.

Les orages ionosphériques, qui peuvent durer plusieurs jours, sont provoqués par des flux de particules chargées d'origine solaire, que le champ magnétique terrestre fait dévier vers les zones aurorales. Ils sont accompagnés d'une augmentation de la concentration électronique dans la région D et d'une extension ainsi que d'une diffusion de la région F2, ce qui peut donner lieu à une diminution des fréquences critiques et à une augmentation de l'altitude des couches ionisées. Les effets des orages ionosphériques sont très importants au maximum d'activité solaire mais leur influence sur les télécommunications est relativement plus grande au minimum d'activité solaire.

Le comportement de l'ionosphère au cours d'un orage dépend d'une façon complexe de la latitude, de la saison, de l'heure locale du début brusque de l'orage et de bien d'autres facteurs que l'on étudie toujours activement. L'allure générale peut se schématiser par une phase positive de quelques heures, attribuable essentiellement à un soulèvement électrodynamique au cours duquel N_I peut augmenter de plus de 100%, suivie par une baisse de 50 à 75% au-dessous des valeurs normales, laquelle dure un jour ou davantage et résulte probablement d'une augmentation du taux de pertes due à des changements au sein de l'atmosphère neutre. Les variations moyennes du CET en temps d'orage, en fonction de la saison et de la latitude invariante, ont été suffisamment définies en amplitude et précisées en temps local pour que l'on puisse élaborer une technique de prévision fondée sur des éléments réels pour les perturbations de la région F [Mendillo et Klobuchar, 1980].

En plus des orages ionosphériques, il existe des perturbations importantes, mais rares, qui se produisent dans toute la région polaire aux latitudes géomagnétiques corrigées supérieures à 60-65°. Il s'agit d'«absorption dans la calotte polaire» (PCA) causée par des événements à protons solaires (SPE) ayant presque toujours pour origine des éruptions solaires importantes. Cet influx de protons solaires de grande énergie dans les régions polaires relativement non protégées augmente considérablement l'ionisation de la région D, ce qui provoque une forte absorption des ondes décamétriques et métriques. Il peut se produire une interruption totale des radiocommunications (black-out) dans la région polaire pendant une durée qui peut atteindre un jour mais l'«absorption dans la calotte polaire» et son effet sur la propagation des ondes myriamétriques et kilométriques peuvent durer de plusieurs jours à une semaine ou plus. Pendant les années d'activité solaire maximale, où les événements à protons solaires prévalent, la propagation de nuit des ondes kilométriques aux latitudes supérieures à 75° peut subir l'influence de ces événements de manière prédominante, car les conditions normales ne se rétablissent pas complètement avant le début de l'événement suivant.

Quelques jours après la phase principale d'un orage géomagnétique, la densité d'ionisation de la région D est accrue aux latitudes subaurorales et moyennes. Ce phénomène peut persister une dizaine de jours ou davantage [Lauter et autres, 1977]. Larsen [1979] a étudié les effets de l'ionisation anormale de la région D sur la propagation des ondes radioélectriques.

Une caractéristique très commune et très dynamique de l'ionosphère des hautes latitudes est le «sous-orage auroral», qui est la manifestation terrestre d'un phénomène plus étendu, appelé «sous-orage magnétosphérique», lequel se produit dans une vaste région de l'espace entourant la Terre. Ces sous-orages auroraux s'accompagnent de précipitations intenses de particules chargées, de champs électromagnétiques, de diffusion de plasma et d'un réchauffement de l'atmosphère neutre. Tous les paramètres de la propagation radioélectrique peuvent varier rapidement sous l'influence d'un sous-orage auroral; les variations le plus fréquemment observées portent sur l'absorption de la région D et sur l'ionisation E sporadique. Le contenu électronique total peut être considérablement modifié. Les effets des perturbations ionosphériques aux latitudes élevées sur la propagation sont examinés plus en détail dans le Rapport 886.

En modifiant l'état de la haute atmosphère, l'homme risque de provoquer des perturbations de l'ionosphère. Les trois types de perturbations de l'ionosphère ainsi produites résultent des facteurs suivants:

- échauffement de l'ionosphère par des ondes radioélectriques, de forte puissance;
- libération de substances chimiquement actives dans l'atmosphère;
- explosions nucléaires en haute altitude qui libèrent des radiations ionisantes et produisent des ondes de choc.

Les conséquences de l'échauffement de l'ionosphère sont décrites dans les Rapports 728 et 893. On trouvera dans le Rapport 1011 une description des effets produits par les modifications chimiques dans l'ionosphère. Ce sont les explosions nucléaires en haute altitude qui ont produit sur l'ionosphère les effets les plus forts et les plus étendus, par exemple interruption totale des radiocommunications, déviation de phase et perturbations ionosphériques itinérantes sur des milliers de kilomètres [Baker et Davies, 1968].

10. Applications aux radiocommunications

L'ionosphère peut permettre la propagation à grandes distances des ondes radioélectriques de très basses fréquences. Les Rapports 265 et 895 traitent de la propagation des ondes de fréquences comprises entre 150 et 1600 kHz est étudiée dans le Rapport 431, duquel il résulte clairement que la propagation par onde ionosphérique n'est possible que de nuit, car l'absorption de jour est trop importante. La gamme des ondes décamétriques (3 à 30 MHz) est celle pour laquelle l'ionosphère joue un rôle fondamental pour la propagation entre stations au sol éloignées. Le Rapport 252 et le supplément au Rapport 252 traitent du calcul du champ de l'onde ionosphérique pour les fréquences de cette gamme. Dans le domaine des ondes métriques (30 à 300 MHz) et au-delà, les ondes traversent généralement l'ionosphère; cependant, dans certaines conditions, la propagation entre deux points au sol peut se faire grâce à la diffusion sur des irrégularités de l'ionosphère et par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la région E. Les Rapports 259 et 263 traitent de la propagation des ondes métriques et des ondes décimétriques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AARONS, J. [1977] Equatorial scintillations: A review. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, **25**, 729-736.

AARONS, J. [1982] Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 360-378.

AARONS, J. et BUCHAU, J. [1978] The localized origin of equatorial F-region irregularity patches. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1659-1664.

AMAYENC, P., BERTIN, F. et PAPET-LEPINE, J. [1971] Sur l'évolution latitudinale du contenu électronique de l'ionosphère. *Ann. de Géophys.*, **27**, 345-357.

AWAKA, J. et FUJITA, M. [1978] Measurement of total electron content by means of differential phase shift method using coherent SHF signals from a geostationary satellite. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 1441-1446.

AWE, O. [1973] Behavior of the F2 layer in the tropical region. Proc. 4th International Symposium on Equatorial Aeronomy. Ibadan Ed. E. Oni, 682-690.

BAKER, D. M. et DAVIES, K. [1968] Waves in the ionosphere produced by nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, **73**, 448-451.

BATES, H. F., BELON, A. E. et HUNSUCKER, R. D. [1973] Aurora and the poleward edge of the main ionospheric trough. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 648-658.

BATES, H. F. et HUNSUCKER, R. D. [1974] Quiet and disturbed electron density profiles in the auroral zone ionosphere. *Radio Sci.*, **9**, 455-467.

BELROSE, J. S. et BOURNE, I. A. [1967] The electron distribution and collision frequency height profile for the lower part of the ionosphere (The D- and lower E-regions): A review of observational data. Proc. Conference Ground Based Radio Wave Propagation Studies of the Lower Ionosphere, 79-96. Defence Res. Board, Ottawa, Canada.

BENT, R. B., LLEWELLYN, S. K., NESTERCZUK, G. et SCHMID, P. E. [1975] The development of a highly-successful world-wide empirical ionospheric model and its use in certain aspects of space communications and world-wide total electron content investigations. Proc. Symposium on the Effect of the Ionosphere on Space Systems and Communications, 23-38. Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

BIRYUKOV, A. V., DANILKIN, N. P., DENISENKO, P. F., KUCHERENKO, G. M., KNORIN, I. A., RUDAKOV, V. A., SOTSKY, V. V., FAER, Yu. N. et SHNYREVA, L. A. [1978] Measurements of election density and collision rate during the flight of Vertikal '4. *Cosmic. Res.*, Etats-Unis d'Amérique, Vol. 16, **5**, 578-582.

BOOKER, H. G. et WELLS, H. W. [1938] Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere. *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, **43**, 249-256.

BRAMLEY, E. N. et YOUNG, M. [1968] Winds and electromagnetic drifts in the equatorial F2-region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 99-111.

CALVERT, W. et SCHMID, C. W. [1964] Spread-F observations by the Alouette topside sounder satellite. *J. Geophys. Res.*, **69**, 1839-1852.

CHAPMAN, S. [1931] The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. *Proc. Roy. Soc.*, **43**, 26.

CLEMESHA, B. R. [1964] An investigation of the irregularities in the F-region associated with equatorial spread-F. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 91-112.

COHEN, R. et BOWLES, K. L. [1961] On the nature of equatorial spread-F. *J. Geophys. Res.*, **66**, 1081-1106.

COHEN, R., BOWLES, K. L. et CALVERT, W. [1962] On the nature of equatorial slant sporadic-E. *J. Geophys. Res.*, **67**, 965-972.

COLE, K. D. [1971] Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 741-750.

CROOM, S., ROBBINS, A. et THOMAS, J. O. [1960] Variations of electron density in the ionosphere with magnetic dip. *Nature*, **185**, 902-903.

DAVIES, K. [1980] Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment. *Space Sci. Revs.*, Vol. 25, 357-430.

DE MENDONCA, F., KANTOR, I. J. et CLEMESHA, B. R. [1969] Low latitude ionospheric electron content measurements during half a solar cycle. *Radio Sci.*, **4**, 823-828.

DUDENEY, J. R., RODGER, A. S. et JARVIS, M. J. [1983] Radio studies of the main F-region trough in Antarctica. *Radio Sci.*, Vol. 18, 927-936.

DULONG, D. D. [1977] Reduction of the uncertainty of radar range correction. AFGL-TR-77-0125 (NTIS Accession N° AD A046166), National Technical Information Service. Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

DYSON, P. L. et BENSON, R. F. [1978] Topside sounder observations of equatorial bubbles. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 795-798.

ECCLES, D. et KING, J. W. [1969] A review of topside sounder studies of the equatorial ionosphere. *Proc. IEEE*, **57**, 1012-1018.

FANG, D. J. et LIU, C. H. [1983] A morphological study of gigahertz equatorial scintillations in the Asian region. *Radio Sci.*, Vol. 18, 241-252.

FARLEY, D. T. [1963] A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **68**, 6083-6097.

FEEN, M. M., PISACANE, V. L. et STURMANIS, M. [1975] Prediction techniques for the effect of the ionosphere on ranging from satellites. Proc. of the Symposium on the Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications, 404-412. Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

GIRALDEZ, A. E., PUIG, L. et LAMA, I. [1981] Variabilidad de la ionización Es ecuatorial. *Geoacta*, Vol. XI.

GUSEV, V. D., DANILKIN, N. P., DENISENKO, P. F. et VODOLAZKIN, V. J. [1977] The determination of effective electron collision frequency profiles in the ionosphere on the basis of Volterra equation (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 17, **4**, 645-648.

HARGREAVES, J. K., POULTER, E. M. et HUNSUCKER, R. D. [1980] ATS-6 electron content measurements from Alaska: recovery from a storm in summer 1979. Proc. Satellite Beacon Symposium, 119-140, Varsovie, Pologne.

HUNSUCKER, R. D. [1975] Chatanika radar investigation of high latitude E-region ionization structure and dynamics. *Radio Sci.*, **10**, 277-288.

HUNSUCKER, R. D. [1979] Morphology and phenomenology of high-latitude E- and F-regions. *STPP**, Vol II, Stock N° 003-017-00471-6. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Etats-Unis d'Amérique.

HUNSUCKER, R. D. et GREENWALD, R. A. (Guest Eds.) [1983] Including special papers: Radio probing of the high-latitude ionosphere and atmosphere: new techniques and new results. *Radio Sci.*, Vol. 18, **6**.

KENT, G. S. et KOSTER, J. R. [1967] Some studies of night-time F-layer irregularities at the equator using very high frequency signals radiated from earth satellites. *Spread-F and its Effects upon Radio Wave Propagation and Communication.* Ed. P. Newman and R. Penndorf, Technivision, Maidenhead, Royaume-Uni.

KERBLAÏ, T. S. et NOSOVA, G. N. [1980] Statistical prediction of Es parameters and echo-signal characteristics. *STPP**, Vol. IV, C77 à C88, Stock N° 003-117-00479-1, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, Etats-Unis d'Amérique.

KING, J. W., REED, K. C., OLATUNJI, E. O. et LEGG, A. J. [1967] The behaviour of the topside ionosphere during storm conditions. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 1355-1363.

KING, J. W., SMITH, P. A., ECCLES, D., FOOKS, G. F. et HELM, H. [1964] Preliminary investigation of the structure of the upper ionosphere as observed by the topside sounder satellite Alouette. *Proc. Roy. Soc.*, **A.281**, 464-487.

KLOBUCHAR, J. A. [1975] A first-order, world-wide, ionospheric time-delay algorithm. Tech. Rep. 75-0502, Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, MA, Etat-Unis d'Amérique.

KLOBUCHAR, J. A. [1977] Correlation distance of mean daytime electron content. AFGL-TR-77-0185 (NTIS Accession N° AD A046166). National Technical Information Service. Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

KLOBUCHAR, J. A. et ALLEN, R. S. [1970] A first-order model of total electron content group path delay for a midlatitude ionosphere. Tech. Rep. 70-0403, Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

KNECHT, R. W. et MCDUFFIE, R. E. [1962] On the width of the equatorial Es belt. *Ionospheric Sporadic-E*, 215-218. Ed. E. K. Smith et S. Matsushita, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.

KNUDSEN, W. C. [1974] Magnetospheric convection and the high-latitude F2 ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1046-1055.

KOTADIA, K. M. [1959] Spread-F in the ionosphere over Ahmedabad 1954-1957. *Proc. Indian Acad. Sci.*, **24**, 259-271.

LARSEN, T. R. [1979] Effects of D-region ionization on radio wave propagation. *STPP*, Vol. II, 617-654, Stock N° 003-017-00471-6. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

LARSEN, T. R., REAGAN, J. B., IMHOF, W. L., MONTBRIAND, L. E. et BELROSE, J. S. [mai 1976] A coordinated study of energetic electron precipitation and D region electron concentrations over Ottawa during disturbed conditions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, **13**, 2200-2212.

LAUTER, E. A., BREMER, J., GRAFE, A., DETERS, I. et EVERS, K. [1977] The post-storm ionization enhancements in the mid-latitude D region and related electron precipitation from the magnetosphere. Heinrich-Hertz Institute STP Rapport N° 9.

* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly.

LEE, M. K. et NISBET, J. S. [1975] Propagation predictions and studies using a ray-tracing programme combined with a theoritical ionospheric model. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-23, 132-136.

LOCKWOOD, G. E. K. et NELMS, G. L. [1964] Topside sound observation of the equatorial anomaly at 75° W longitude. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 569-580.

LOCKWOOD, G. E. K. et PETRIE, L. E. [1963] Low latitude field aligned ionization observed by the Alouette topside sounder. *Planet. and Space Sci.*, **11**, 327-330.

LYON, A. J., SKINNER, N. J. et WRIGHT, R. W. H. [1961] Equatorial spread-F at Ibadan, Nigeria. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **21**, 100-119.

LYON, A. J. et THOMAS, L. [1963] The F2-region equatorial anomaly in the African, American and East Asian sectors during sunspot maximum. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **25**, 373-386.

MARUYAMA, T. et MATUURA, N. [1980] Global distribution of occurrence probability of spread echoes based on Ionosphere Sounding Satellite-b observation. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **27**, 201-216.

MATSUSHITA, S. [1962] Lunar tidal variations of sporadic-E. *Ionospheric Sporadic-E*, 194-214. Ed. E. K. Smith et S. Matsushita, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.

MATSUSHITA, S. et SMITH, L. G. (Ed.) [1975] *Numéro spécial de Radio Sci.*, Vol. 10, **3**.

MATUURA, N. [1980] Characteristics of global distribution of foF2 based on topside sounding by ISS-b, Highlights of the Japanese IMS program. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 239-247.

MAYAUD, P. N. [1965] Morphological analysis of the day-to-day variability in the «regular» daily variations S_r of the Earth's magnetic field. *Ann. de Géophys.*, **21**, 369-401.

MENDILLO, M. et KLOBUCHAR, J. A. [1975] Investigations of the ionospheric F-region using multi-station total electron content observations. *J. Geophys. Res.*, **80**, 643-650.

MENDILLO, M. et KLOBUCHAR, J. A. [1980] A morphology-based prediction scheme for the coupled latitudinal and local time development of F-region storms. *STPP*, Vol. IV, C-15 à C-26, Stock N° 003-117-00479-1. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

MENDILLO, M., KLOBUCHAR, J. A., FRITZ, R. B., DA ROSA, A. V., KERSLEY, L., YEH, K. C., FLAHERTY, B. J., RAGASWAMY, S., SCHMID, P. E., EVANS, J. V., SCHODEL, J. P., MATSOUKAS, D. A., KOSTER, J. R., WEBSTER, A. R. et SCHIN, P. [1974] Behaviour of the ionospheric F-region during the great solar flare of 7 August 1972. *J. Geophys. Res.*, **79**, 665-672.

MULDREW, D. B. [1965] F layer ionization troughs deduced from Alouette data. *J. Geophys. Res.*, **70**, 2635-2650.

MULDREW, D. B. [1980a] Characteristics of ionospheric bubbles determined from aspect-sensitive scatter spread F observed in Alouette-1. *J. Geophys. Res.*, **85**, 2115-2123.

MULDREW, D. B. [1980b] The formation of ducts and spread F and the initiation of bubbles by field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, **85**, 613-625.

MULDREW, D. B. [1983] Alouette – ISIS radio wave studies of the cleft, the auroral zone and the main trough and of their associated irregularities. *Radio Sci.*, Vol. 18, 1140-1150.

NELMS, G. L. et CHAPMAN, J. H. [1970] The high latitude ionosphere: results from the Alouette/ISIS topside sounders. *The Polar Ionosphere and Magnetospheric Processes*, 233-269, Ed. G. Skovli, Gordon Breach Publishing Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

OSBORNE, B. W. [1951] Ionospheric behaviour in the F-2 region at Singapore. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **2**, 66-78.

RAO, C. S. R. et MALHOTRA, P. L. [1964] A study of geomagnetic anomaly during I.G.Y. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 1075-1085.

RAO, N. N., YOUAKIM, M. Y. et YEH, K. C. [1971] Feasibility study of correcting for the excess time delay of transionospheric navigational varying signals. Tech. Report No. 43, (SAMSO-TR-71-163), University of Illinois, Ionospheric Physics Laboratory, Urbana, IL, Etats-Unis d'Amérique.

RASTOGI, R. G. [1959] The diurnal development of the anomalous equatorial belt in the F2-region of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **64**, 727-732.

RISHBETH, H. et GARRIOTT, O. K. [1969] Introduction to ionospheric physics. *Int. Geophys. Series*, Vol. 14. Academic Press, New York et Londres.

RUSH, C. M. et MILLER, D. [1972] Some aspects of the day-to-day variability of the equatorial anomaly; American and Japanese sectors. *Radio Sci.*, **7**, 1085-1094.

RUSH, C. M., RUSH, S. V., LYONS, L. R. et VENKATESWARAN, S. V. [1969] Equatorial anomaly during a period of declining solar activity. *Radio Sci.*, **4**, 829-841.

RYCROFT, M. J. et THOMAS, J. O. [1970] The magnetospheric plasmapause and the electron density trough at the Alouette 1 orbit. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 18, 6580.

SHARMA, R. P. et HEWENS, E. J. [1976] A study of the equatorial anomaly at American longitudes during sunspot minimum. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 475-484.

SMITH, R. A. [1967] A survey of laboratory data for slow electrons in air, nitrogen and oxygen relevant to wave propagation and wave interaction in the lower ionosphere. Proc. Conference on Ground Based Radio Wave Propagation Studies of the Lower Ionosphere, Defence Research Board, Ottawa, Canada.

SOICHER, H. [1976] Comparative ionospheric and plasmaspheric electron contents from three world regions. *Nature*, Vol. 264, 46-48.

SOICHER, H. [1977] Ionospheric and plasmaspheric effects in satellite navigation systems. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-25, 705-708.

SPIRO, R. W., HEELIS, R. A. et HANSON, W. B. [1978] Ion convection and the formation of the mid-latitude F region ionization trough. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4255-4264.

THRANE, E. V. [1968] Collision Frequency in the High Latitude D-Region. *Ionospheric Radio Communications*, 63-72. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

TIMLECK, P. L. et NELMS, G. L. [1969] Electron densities less than 100 cm^{-3} in the topside ionosphere. *Proc. IEEE*, **57**, 1164-1171.

TITHERIDGE, J. E. [1972] Determination of ionospheric electron content from the Faraday rotation of geostationary satellite signals. *Planet. and Space Sci.*, **20**, 353-369.

TYAGI, T. R., YEH, K. C., TAURIAINEN, A. et SOICHER, H. [1982] The electron content and its variation at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 2525-2532.

VILA, P. [1971a] Intertropical F2 ionization during June and July 1966. *Radio Sci.*, **6**, 689-698.

VILA, P. [1971b] New dynamic aspects of intertropical F2 ionization. *Radio Sci.*, **6**, 945-956.

VODOLAZKIN, V. I., DANILKIN, N. P., DENISENKO, P. F. et FAER, Yn. N. [1983] Empiricheskie vysotnye zavisimosti effektivnoi chastoty soudarenii v sredneshirotnoi ionosfere (Relations empiriques entre l'altitude et la fréquence effective des collisions dans l'ionosphère de latitude moyenne). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 23, **1**, 25-30.

WAGNER, C.-U., GRAFE, A. et NIKUTOWSKI, B. [1982a] Energetic electron fluxes and ionospheric absorption during the August 1972 event. *Gerlands Beitr. zur Geophys.*, Vol. 91, 457-479.

WAGNER, C.-U., RANTA, H. et RANTA, A. [1982b] Night-time ionospheric absorption during and after magnetospheric storms from auroral (L = 6.0) to medium (L = 2.5) latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 747-757.

WAKAI, N. [1971] Study on the night-time E region and its effects on the radio wave propagation. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **18**, 245-348.

WALDMAN, H. et DA ROSA, A. V. [1971] Prognostication of ionospheric electron content. Tech. Report SU-SEL-71-046 (SAMSO-TR-71-82), Stanford University, Radioscience Laboratory, Stanford, CA, Etats-Unis d'Amérique.

WALDTEUFEL, P. [1965] Study of the instability associated with the equatorial sporadic-E layer. *Ann. de Géophys.*, **21**, 579-604.

WALKER, G. O. et CHAN, C. S. [1976] The diurnal variation of the equatorial anomaly in the topside ionosphere at Sunspot maximum. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 699-706.

WHITEHEAD, J. D. [1970] Production and prediction of sporadic E. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **8**, 65-144.

WHITTEKER, J. H. [1976] The magnetospheric cleft – ionospheric effects. *J. Geophys. Res.*, **81**, 1279-1288.

WRIGHT, R. W. H. [1959] Geomorphology of spread-F and characteristics of equatorial spread-F. *J. Geophys. Res.*, **64**, 2203-2207.

YEH, K. C., SOICHER, H. et LIU, C. H. [1979] Observations of equatorial ionospheric bubbles by radio propagation methods. *J. Geophys. Res.*, **84**, 6589-6594.

RAPPORT 886-1

PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES A L'IONOSPHÈRE AUX LATITUDES ÉLEVÉES AFFECTANT LES RADIOCOMMUNICATIONS

(Programme d'études 25B/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Si l'ionosphère ne se comporte pas aux latitudes élevées comme aux latitudes plus basses, c'est surtout parce qu'elle y est exposée à l'effet de perturbations qui ont leur siège dans l'espace interplanétaire et dans la magnétosphère. En raison de la pression du plasma interplanétaire, lequel se déplace en s'éloignant du Soleil (vent solaire), le champ magnétique terrestre est confiné dans un volume limité, qu'on appelle la magnétosphère. Aux basses latitudes, une ligne de force du champ magnétique – si nous la suivons dans le sens ascendant – passe horizontalement au-dessus de l'équateur magnétique à une faible distance de la Terre puis revient vers la Terre dans l'hémisphère opposé, en restant partout bien à l'intérieur de la magnétosphère. Aux latitudes élevées, il n'en est pas de même: les lignes de force s'éloignent beaucoup de la Terre, soit vers la magnétosphère externe, soit vers l'espace interplanétaire. Etant donné que les particules chargées électriquement peuvent se déplacer aisément le long de ces lignes de force, alors qu'un mouvement transversal leur est difficile, on voit que l'ionosphère aux basses latitudes est protégée contre les événements qui se produisent à grande distance de la Terre, alors que ce n'est pas le cas pour l'ionosphère aux latitudes élevées. Même si le milieu interplanétaire est dans un état non perturbé, la magnétosphère externe extrait de l'énergie du vent solaire pour créer ses propres événements (sous-orages), lesquels peuvent à leur tour perturber l'ionosphère aux latitudes élevées.

1.1 *Influence des événements ayant leur siège dans le milieu interplanétaire ou dans la magnétosphère*

L'influence dont il s'agit se manifeste principalement de deux façons:

- des particules énergétiques (électrons et protons) provenant du Soleil et de la magnétosphère extra-atmosphérique peuvent pénétrer dans l'amosphère et créer une ionisation à des altitudes diverses, selon leur pouvoir de pénétration, c'est-à-dire selon leur énergie;
- le vent solaire qui souffle le long du champ magnétique terrestre crée un effet dynamo qui, non seulement accélère certaines des particules chargées qui acquièrent ainsi une grande énergie, mais encore induit un champ électrique perpendiculaire au champ magnétique, ce qui provoque des dérives horizontales de l'ionisation à des latitudes élevées et contribue à la formation d'irrégularités.

1.2 *Effets sur l'ionosphère*

Les effets les plus importants qu'exerce l'ionosphère aux latitudes élevées sur le fonctionnement des systèmes de télécommunication sont les suivants:

- les électrons d'une énergie supérieure à 20 keV et les protons d'une énergie de l'ordre de 10 MeV pénètrent à l'altitude de la région D et y créent une ionisation supplémentaire, ce qui augmente l'absorption des ondes et donne parfois lieu à une interruption totale des radiocommunications en ondes décamétriques;
- les électrons d'une énergie de l'ordre de 10 keV pénètrent à l'altitude de la couche E et y créent des couches réfléchissantes. Ces dernières peuvent ou non être utiles pour les radiocommunications selon leur régularité dans l'espace et dans le temps et selon que la région D est elle-même ou non le siège d'une ionisation importante;
- les électrons d'une énergie de l'ordre de 50 à 500 eV pénètrent à l'altitude de la région F et donnent lieu à des renforcements irréguliers de la densité électronique, surtout vers le bas de la région;
- la région F polaire contient presque toujours des irrégularités de petite échelle qui diffusent les ondes décamétriques et donnent lieu à des scintillations sur les signaux transionosphériques transmis à des fréquences plus élevées. Ces irrégularités sont, en certains endroits, dues à des précipitations, mais elles peuvent en d'autres endroits être dues à des instabilités du plasma associées aux champs électriques;
- les variations du contenu électronique affectent le temps de propagation, ce qui donne lieu à des erreurs dans les systèmes de mesure de la distance des satellites et dans les systèmes de navigation;
- la dérive horizontale de l'ionisation due au champ électrique dans la magnétosphère est importante dans la région F, où le temps de recombinaison est long;
- le champ électrique dans la magnétosphère, en même temps que l'ionisation produite lors des aurores, donne naissance, aux altitudes de la région E, à des irrégularités qui entraînent une diffusion de l'énergie radioélectrique des ondes décamétriques, métriques et décimétriques.

Une brève revue des effets de l'ionosphère sur la propagation des ondes radioélectriques aux latitudes élevées a été présentée par Hunsucker [1983]; des renseignements plus précis sont donnés dans [Hunsucker et Greenwald, 1983]. La Fig. 1 donne une représentation théorique, dans un plan vertical nord-sud, des principales caractéristiques ionosphériques mentionnées dans les § 3.5 à 5.3.

2. Systèmes de coordonnées et activité aurorale

2.1 *Coordonnées magnétiques*

Etant donné que la morphologie de l'ionosphère aux latitudes élevées dépend beaucoup du champ magnétique, c'est en fonction de coordonnées magnétiques que l'on peut le mieux décrire ses propriétés. L'une de ces coordonnées est la latitude géomagnétique. La coordonnée orthogonale la plus utile est l'heure locale magnétique, laquelle ne diffère de l'heure locale ordinaire que parce qu'elle est rattachée au pôle géomagnétique et non au pôle géographique. Pour des points suffisamment éloignés de la région située entre ces deux pôles, les deux heures locales sont sensiblement égales. Dans chaque hémisphère, on trace un référentiel «latitude magnétique – heure locale magnétique» par rapport à une ligne joignant le pôle magnétique au Soleil. Dans ce référentiel, l'observateur sur Terre se trouve sur une plate-forme mobile qui se déplace au-dessous de phénomènes stationnaires dans l'espace. Il y a une importante exception: le terminateur solaire, lequel est fixe par rapport au pôle géographique à un instant donné de l'année. Dans les coordonnées magnétiques que nous venons d'indiquer, le terminateur solaire est animé d'un mouvement diurne qui le rapproche et l'éloigne du Soleil.

On utilise plusieurs sortes de latitudes magnétiques. La latitude «géomagnétique» simple, fondée sur la représentation approximative du champ magnétique par un doublet centré, est très couramment utilisée dans les travaux sur l'ionosphère et elle est suffisante du moment que l'on n'exige pas une trop grande précision. La latitude géomagnétique «corrigée» représente le champ géomagnétique réel avec plus de précision; elle est très utilisée dans les études sur les aurores. Hakura [1965] et Gustafsson [1970] ont donné des tables de conversion. Les lignes d'égale valeur de la latitude géomagnétique corrigée sont représentées, pour les régions polaires, sur les Fig. 2 et 3. Un système correspondant d'heure locale magnétique est défini et le système de coordonnées complet ainsi établi est communément appelé système CGLT (corrected geomagnetic – local time). La latitude «invariante» est une coordonnée un peu plus compliquée [McIlwain, 1966], dont on se sert surtout pour l'étude des particules énergétiques piégées. A la surface de la Terre, dans les régions polaires, elle est presque identique à la latitude géomagnétique corrigée.

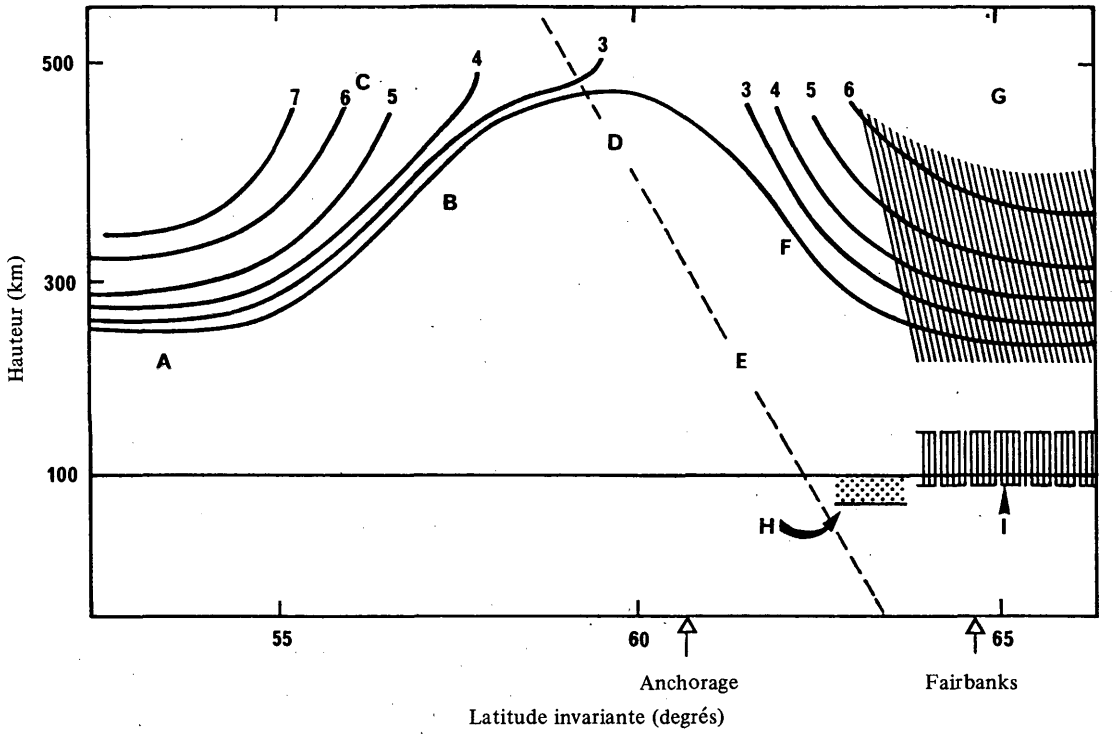


FIGURE 1 – *Tracé théorique des fréquences de plasma dans le plan vertical nord-sud passant par Fairbanks et Anchorage, Alaska.*

Représentation des caractéristiques ionosphériques les plus marquantes qui affectent la propagation de l'onde ionosphérique (ondes hectométriques et décamétriques) [Hunsucker, 1983]

A: région extérieure au creux côté équateur
B: bord du creux côté équateur
C: fréquence du plasma (MHz)
D: minimum du creux
E: ligne de champ de la plasmapause
F: bord du creux côté pôle
G: bulles dans la région F
H: absorption renforcée dans la région D
I: irrégularités de la région E

2.2 *L'ovale auroral*

Il existe deux sortes d'aurores: l'aurore visible et l'aurore radioélectrique, lesquelles peuvent de plus être discrètes ou diffuses. On pense que l'aurore visible discrète et l'aurore radioélectrique discrète sont en corrélation étroite. Par contre, il n'existe aucune corrélation temporelle évidente entre l'aurore visible diffuse et l'aurore radioélectrique diffuse [Fremouw et Fang, 1975]. L'ovale auroral [Feldstein et Starkov, 1967] défini dans le système CGLT, est très utilisé comme référence pour la description de maint phénomène propre aux latitudes élevées. C'est une région annulaire dans laquelle la fréquence d'occurrence d'aurores visibles discrètes est élevée. L'ovale relatif à une activité magnétique modérée ($Q = 3$, voir le § 2.6) est délimité par les courbes en pointillé des Fig. 4 à 10. L'analyse des données relatives à l'activité magnétique relevées pendant un cycle solaire de 11 ans montre que $Q = 3$ correspond approximativement à la valeur de quartile supérieur [Reilly, 1978]. L'ovale est excentré par rapport au pôle géomagnétique d'environ 4° dans la direction de la partie de la Terre située dans la nuit. Un observateur situé au-dessous de l'ovale à minuit se trouvera donc, à midi, décalé par rapport à lui en direction de l'équateur. On définit généralement la calotte polaire comme étant la région comprenant le pôle et délimitée par le bord de l'ovale auroral situé du côté des latitudes élevées.

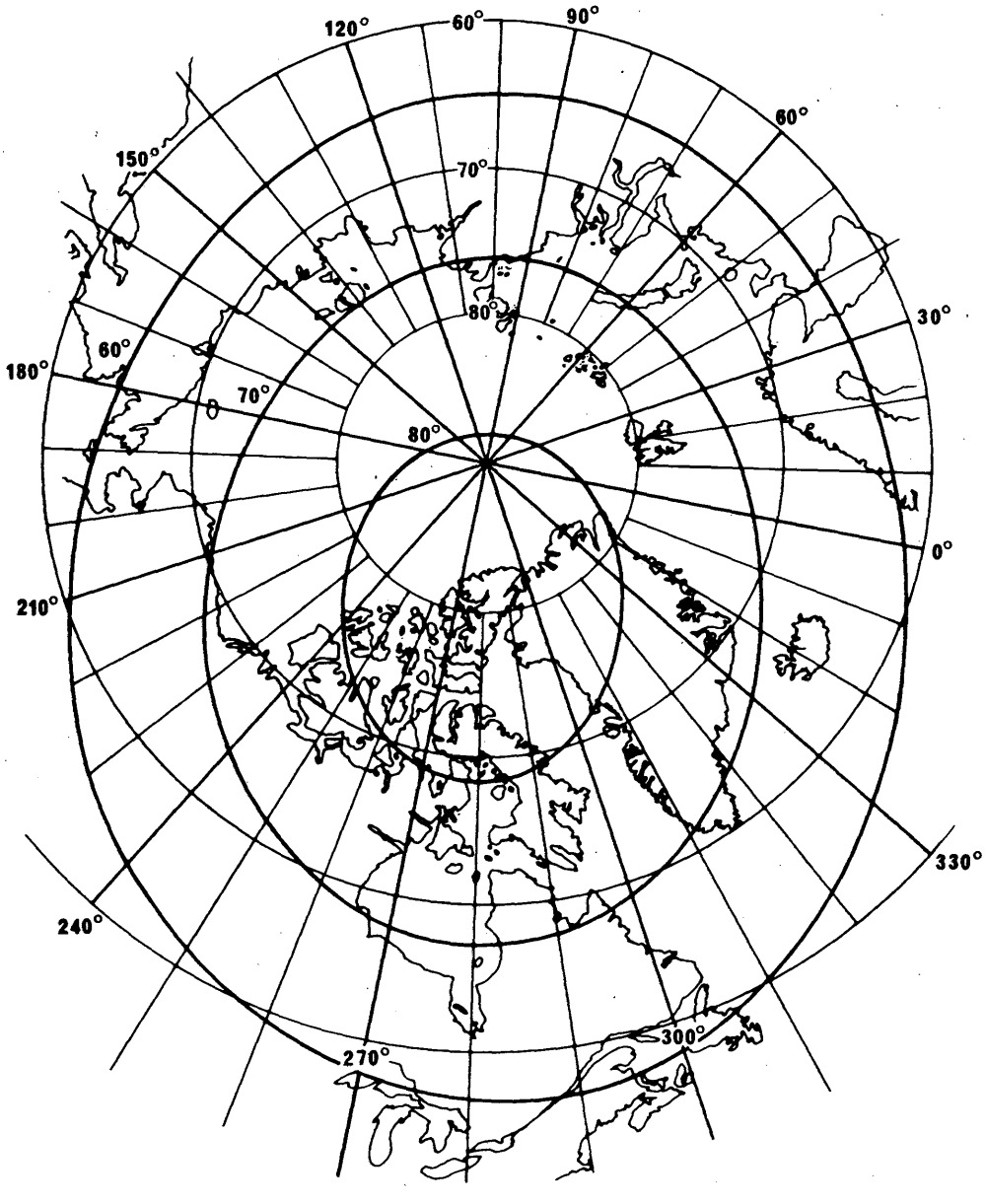


FIGURE 2 – *Latitude géomagnétique corrigée dans l'hémisphère Nord*

(A titre de référence on a également représenté la latitude géographique et la longitude géographique.)

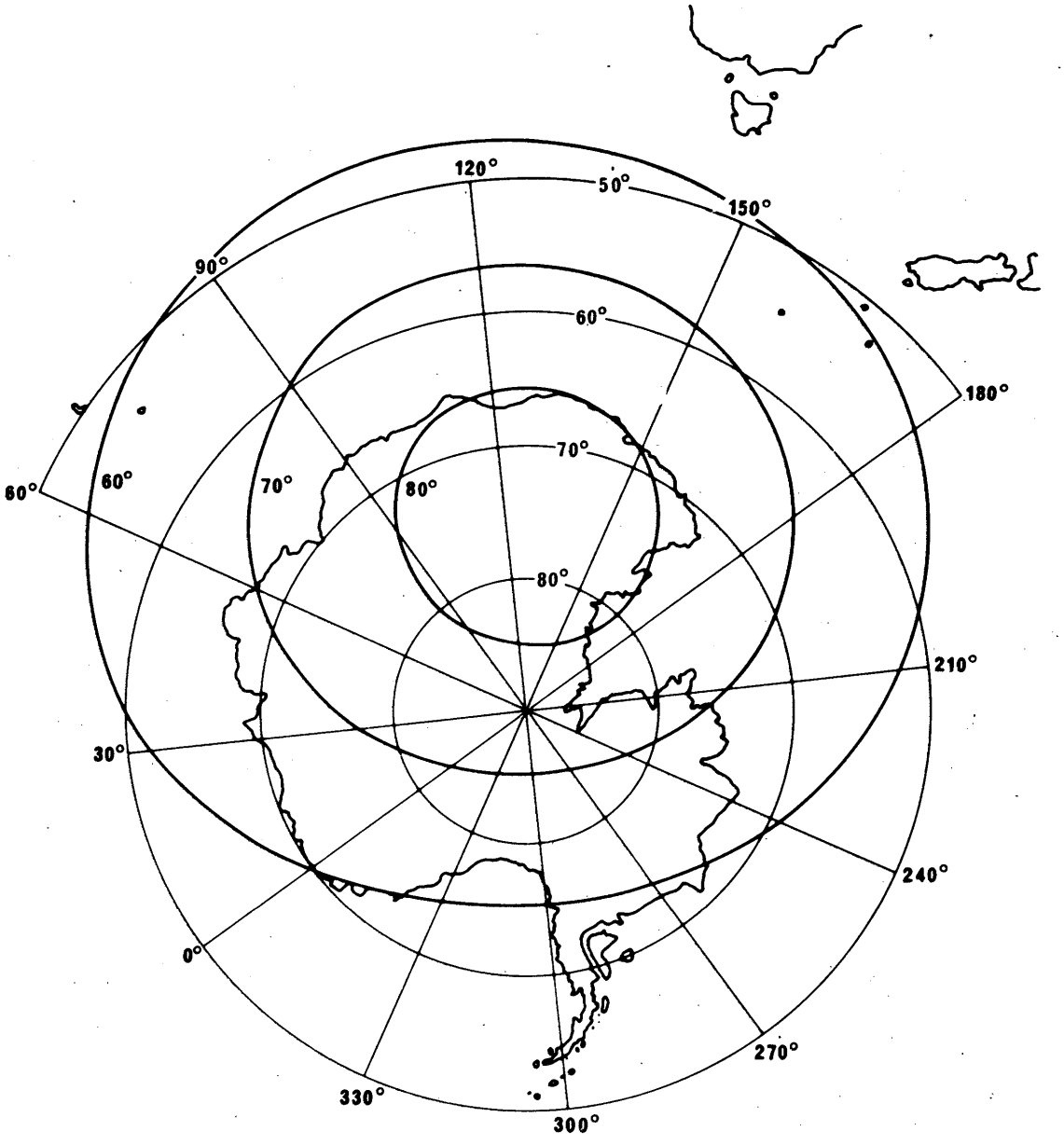


FIGURE 3 – *Latitude géomagnétique corrigée dans l'hémisphère Sud*

La notion d'ovale auroral est une notion statistique, déduite à l'origine de photographies de formes aurorales discrètes, mais Feldstein et Starkov [1967] ont montré qu'elle a également une certaine valeur du point de vue instantané, tout comme des photographies prises de l'espace [Akasofu, 1974]. Les divers types de précipitations de particules qui se produisent à l'intérieur de l'ovale correspondent à une fonction dynamique de l'emplacement et du temps [Eather, 1973]. La plupart des précipitations de particules qui engendrent l'aurore visible se produisent dans le secteur «nuit». L'ovale auroral est le plus large dans ce secteur. Certaines précipitations de faible énergie se produisent hors de l'ovale du côté polaire et une bonne partie des précipitations de particules énergétiques qui donnent lieu à l'absorption radioélectrique se produit en direction de l'équateur.

Hardy et MacKeen [1980] ont proposé un autre modèle de l'ovale auroral. Ce modèle a été établi à partir de données recueillies par les détecteurs de précipitations d'électrons placés à bord des satellites du «Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)» [Gussenhoven et autres, 1981].

2.3 *La zone de précipitations extérieure*

Du côté de l'équateur par rapport à l'ovale, il existe une zone de précipitations qui ne donne pas lieu à des aurores discrètes [Hartz et Brice, 1967; Hartz, 1971]. Cette zone est de forme plus circulaire que l'ovale et elle se situe entre 60° et 70° de latitude géomagnétique. Les phénomènes en relation avec la précipitation des électrons de plus forte énergie, tels que l'aurore diffuse, l'absorption aurorale des ondes radioélectriques et les rayons X, apparaissent avec le plus d'intensité dans la zone extérieure de l'ovale du côté de l'équateur, ce qui signifie probablement qu'il y a là un déversoir d'énergie pour la ceinture extérieure de Van Allen de particules énergétiques piégées. Il sera question de l'absorption radioélectrique dans cette zone au § 5.1 ci-dessous et les Fig. 8 et 9 représentent des schémas d'absorption.

2.4 *Les sous-orages*

Les sous-orages, décrits par Akasofu [1968], sont les perturbations élémentaires de la magnétosphère qui affectent l'ionosphère polaire. Selon la façon dont ils se manifestent, on parle de sous-orages magnétiques, de sous-orages auroraux, de sous-orages d'absorption, etc. Le mécanisme qui est à la base de toute cette activité est le sous-orage magnétosphérique, violente agitation des parties les plus lointaines de la magnétosphère, qu'Akasofu [1977] a décrit en grand détail. Pendant leur durée, qui est d'environ une heure, l'aurore apparaît, se développe en intensité et s'étend en latitude, surtout aux environs de minuit, puis, si aucun autre sous-orage ne se produit, retrouve son calme. Plusieurs sous-orages peuvent se produire pendant une même nuit. Au cours d'un sous-orage, on observe des perturbations magnétiques et divers effets ionosphériques, à savoir un renforcement de l'absorption, l'apparition d'une couche E sporadique, des irrégularités et une redistribution de l'ionisation de la couche F.

2.5 *Les orages*

Aux latitudes élevées, comme il y a presque toujours une activité de sous-orage, on peut difficilement faire la distinction entre une période d'orage et une période sans orage. On peut simplement qualifier de «période d'orage» une période plus perturbée que les autres. Au cours d'un orage géomagnétique, dont la durée peut être d'un jour ou davantage, les sous-orages se succèdent rapidement.

2.6 *L'activité magnétique et les dimensions de l'ovale auroral*

L'ovale auroral s'étend en direction de l'équateur lorsque l'activité magnétique augmente, et les phénomènes ionosphériques associés suivent son mouvement. Kamide et autres [1976] ainsi que Kamide et Winningham [1977] ont observé que, au cours d'un sous-orage, l'ovale auroral se déplace de 1° à 3° dans la direction de l'équateur. Ils ont également noté une influence du champ magnétique interplanétaire, l'étendue en latitude de l'ovale augmentant d'environ 0,5° par γ d'augmentation de la composante sud de ce champ.

Feldstein a caractérisé les ovales par un certain indice d'activité magnétique (Q). Il existe une correspondance assez vague entre Q et l'indice K_p qui est un indice planétaire et non auroral [Valley, 1965]. Un indice d'électrojet auroral (AE) a été défini pour mesurer de l'activité des sous-orages [Allen et autres, 1979].

Chubb et Hicks [1970] ont montré que le bord de l'aurore visuelle situé du côté de l'équateur se déplace en direction de cette ligne de 1,7° par unité de K_p du côté éclairé et de 1,3° du côté obscur, la variance quadratique moyenne étant cependant de 3°. Les mouvements des irrégularités de la région F observés par Pike [1972] sont en harmonie avec ces valeurs. Pendant des orages magnétiques particulièrement intenses, les effets de l'aurore se déplacent vers l'équateur jusqu'à des latitudes que l'on qualifierait généralement de moyennes.

Whalen [1970] a proposé une méthode qui permet de déterminer l'emplacement de l'ovale auroral dans l'espace et le temps.

3. La région F aux latitudes élevées

3.1 *L'ionisation d'origine solaire*

La région F, lorsqu'elle est éclairée par le Soleil, doit son existence avant tout au rayonnement solaire. Même lorsque le Soleil est proche de l'horizon, il produit une ionisation avec un taux comparable à celui qui est dû aux précipitations dans le secteur «midi» de l'ovale auroral, là où la production de particules de la région F est maximale [Whitteker, 1977]. Un mouvement de dérive horizontale fait pénétrer cette ionisation dans la partie obscure de la calotte polaire. Cependant, en général, la calotte polaire est une région de faible densité ionosphérique comparée à la zone aurorale.

3.2 *La dérive d'ionisation de la région F à l'intérieur de la calotte polaire*

L'ionisation dérive en traversant la calotte polaire depuis le côté éclairé de la Terre vers son côté nocturne, puis revient ensuite de chaque côté de la calotte polaire. La Fig. 4 illustre ce mouvement; celui-ci donne lieu à une «langue» d'ionisation qui s'étend à travers la calotte polaire du côté éclairé jusqu'au côté obscur [Nishida, 1967]. Un exemple tiré de mesures faites dans l'hémisphère Nord au cours de l'AGI est représenté sur la Fig. 5. Sato et Rourke [1964] ont abouti à des résultats analogues pour l'hémisphère Sud. Le flux de retour produit l'effet inverse, à savoir un déplacement de l'ionisation de plus faible densité de la partie nocturne de la Terre en direction du Soleil, ce qui contribue à la formation d'un creux de densité électronique (voir le § 3.6). La «langue» est plus prononcée au voisinage de l'équinoxe, lorsque le terminateur solaire traverse la calotte polaire, mais elle existe aussi en été et en hiver. La vitesse du mouvement de dérive est variable; il en est donc de même de la distribution de la densité. Hill [1963] a décrit des phénomènes «F sporadiques» au cours desquels des densités anormalement élevées de la couche F se produisent au cours des mois d'équinoxe et d'hiver; de tels phénomènes sont accompagnés d'une langue d'ionisation très prononcée.

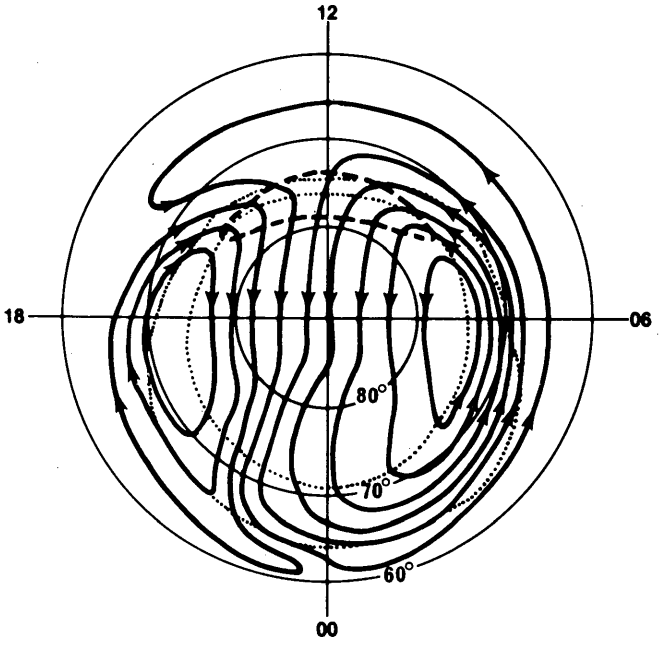


FIGURE 4 – *Modèle du schéma de dérive de la couche F, compte tenu de la rotation de la Terre [Heppner, 1977]*

La vitesse de cette dérive est proportionnelle à la densité des lignes de flux; au voisinage du pôle, elle est d'environ 0,4 km/s. Les coordonnées sont la latitude invariante et l'heure magnétique locale. Une région d'intense précipitation d'électrons de faible énergie se trouvant sur le midi magnétique est représentée par une ligne tiretée. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

3.3 *Variation de la région F en fonction du Temps universel (UT)*

Dans l'hémisphère Sud, la densité de la région F subit une influence du Temps universel distincte de celle de l'heure locale. Il existe notamment une variation diurne apparente au pôle Sud géographique, point où la notion d'heure locale n'a pas de sens. En ce point, comme en d'autres du même hémisphère, la densité électronique présente un maximum aux environs de 0700 UT, ce qui, pour le pôle Sud géographique, est à peu près le minuit magnétique. On attribue généralement cet effet à des vents d'air neutre qui soufflent au-dessus des régions polaires en s'éloignant du Soleil et qui, soulevant les couches ionisées du côté nocturne du pôle magnétique, s'opposent à une recombinaison rapide [Hopkins et autres, 1973; Konnlein et Raitt, 1978]. Cependant, 0700 UT étant aussi le moment où la plus grande fraction de la calotte polaire (magnétique) Sud est ensoleillée, cet effet de l'UT aux latitudes élevées peut être dû en partie à la dérive dont il a été question au § 3.2 ci-dessus. Dans l'hémisphère Nord, on constate un maximum de densité électronique moins net, au-dessus de 60° à 1800 UT.

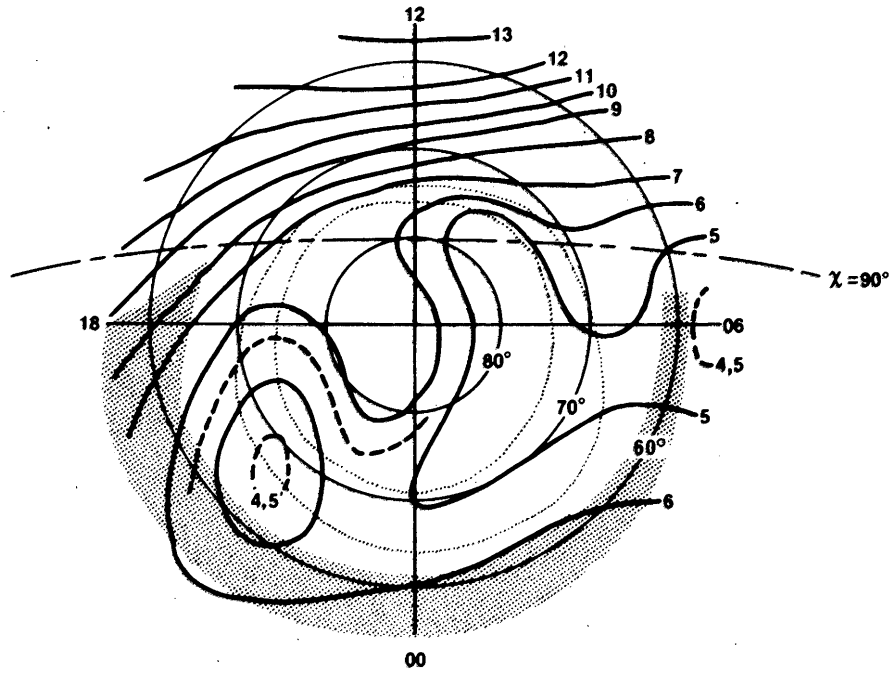


FIGURE 5 – *Fréquences médianes de pénétration dans la couche F dans l'hémisphère Nord pour le mois de mars 1957 à 0600 UT [Hill et Penndorf, 1959]*

Coordonnées: système CGLT. Les fréquences indiquées sur la figure sont en MHz. La ligne tiretée marquée $\chi = 90°$ est le terminateur solaire. La zone grisée représente la position du creux ionosphérique pour $K_p = 3$ selon le modèle de Halcrow et Nisbet [1977]. Les frontières de l'ovale auroral ($Q = 3$) sont représentées par les courbes en pointillés.

3.4 *La calotte polaire dans l'obscurité*

C'est lorsque la plus grande partie de la calotte polaire est dans l'obscurité (autour du solstice d'hiver, et lorsque le pôle magnétique se trouve du côté du pôle géographique opposé au Soleil) que la région F présente le plus de variations dans l'espace et dans le temps. En pareilles circonstances, les fréquences de pénétration sont couramment de 2 à 3 MHz [Whitteker et autres, 1978], mais on en a parfois observé des inférieures à 1 MHz, les densités les plus faibles se produisant de préférence vers minuit local dans la calotte polaire [Brinton et autres, 1978].

3.5 *La région F au-dessous de l'ovale auroral*

Une région annulaire comprenant la partie de l'ovale située du côté du pôle ainsi que la partie de la calotte polaire située à quelques degrés de l'ovale est caractérisée par la précipitation d'électrons de faible énergie, qui cèdent leur énergie à l'altitude de la région F. Cette précipitation est en général suffisamment intense pour que la fréquence de pénétration dans cette partie de la couche F ne puisse pas descendre au-dessous de 3 MHz environ; en certains endroits, elle peut être bien plus élevée que cela. On note des variations importantes de la densité électronique sur de faibles distances, ce qui rend difficile l'interprétation des fréquences de pénétration à partir des ionogrammes, lesquels ont néanmoins des caractéristiques bien définies [Wagner et autres, 1973; Pike et autres, 1974]. Dans la région voisine du midi magnétique entre environ 75° et 80° de latitude magnétique, une telle précipitation est particulièrement intense et persistante et elle a souvent pour conséquence d'augmenter de plusieurs MHz la fréquence de pénétration de l'ionisation dans la gamme des altitudes de 200 à 300 km [Pike, 1971; Whitteker, 1976]. Cette région, appelée faille ou cornet diurne, est indiquée approximativement sur la Fig. 4. La précipitation engendre des irrégularités à grande échelle (dizaines de kilomètres), dont l'échelle diminue (dizaines de mètres ou moins) à mesure qu'elles dérivent, la nuit, vers l'équateur [Kelley et autres, 1982; Muldrew et Vickrey, 1982].

3.6 *Le creux de densité électronique de la région F*

Du côté équateur de l'ovale auroral, un creux se forme dans la densité électronique de la région F de nuit. La densité peut devenir faible parce qu'aucune ionisation n'est fournie ni par une dérive dans la direction opposée à celle du Soleil, ni par précipitation, ni par l'effet d'emmagasinage des lignes de force du champ magnétique fermées en permanence. Le minimum de densité se trouve aux environs de 60° de latitude magnétique, sa position dépendant de l'activité magnétique. Le creux dont il s'agit est une caractéristique persistante de la région F de nuit, bien qu'en fait, il soit beaucoup plus prononcé à certains moments qu'à d'autres. Lorsqu'il est éclairé par le Soleil, il est d'ordinaire rempli par l'ionisation solaire. Il se déplace en direction de l'équateur lorsque l'activité magnétique augmente. Sa largeur varie entre 5° et 10° [Mendillo et Chacko, 1977]. Le rapport de la densité à l'intérieur du creux à la densité à son extérieur peut varier entre une valeur inférieure à 0,1 et une valeur presque égale à 1, mais on n'a pas observé qu'il dépende de l'activité magnétique. Du fait de la variabilité journalière de sa profondeur et de sa latitude, le creux a tendance à ne pas apparaître dans les valeurs médianes mensuelles; mais il est visible dans les observations fournies chaque jour par les satellites. Halcrow et Nisbet [1977] ont imaginé un modèle du creux de densité électronique; dans ce modèle, la densité à l'intérieur du creux est égale à 0,25 fois la densité à l'extérieur. La Fig. 5 représente ce modèle pour $K_p = 3$, ce qui est sensiblement la valeur médiane de l'indice pour les données relatives à la couche F qui sont indiquées.

3.7 *Irrégularités de la région F*

On trouve des irrégularités plus ou moins en permanence dans toute la région polaire, depuis environ 60° de latitude géomagnétique corrigée [Clark et Raitt, 1975]. Keskinen et Ossakow [1983] ont étudié les théories relatives à la formation des irrégularités aux latitudes élevées. Il existe, associée à cet ovale, une «zone d'irrégularités» située dans le bas de la couche F (voir le § 3.5 ci-dessus). Selon Aarons et Allen [1971], la position moyenne de la limite du côté de l'équateur de la zone d'irrégularités diminue en latitude d'environ 1,6° par unité d'augmentation de l'indice K local. Nous reparlerons des irrégularités de la couche F à propos des scintillations au § 8.1.

Des aurores radioélectriques dérivant depuis le lever jusqu'au coucher du Soleil ont été observées dans l'ionosphère de la calotte polaire en hiver par Weber et Buchau [1981], et Buchau et autres [1983]. Elles constituent des renforcements substantiels (de 5 à 8 fois) au-dessus d'une densité de fond nominale de 10^5 électrons par cm^3 (foF2 ~ 3 MHz) et occupent la calotte polaire surtout pendant des conditions géomagnétiques calmes. Pendant des conditions plus perturbées ($K_p > 4$), on observe de grandes «taches» de densité électronique qui se déplacent à grande vitesse dans la direction opposée à celle du Soleil. Le diamètre de ces «taches» est supérieur à 1000 km et elles peuvent donc affecter les radiocommunications à ondes décamétriques sur des circuits dont les points de réflexion sont situés dans la calotte polaire.

3.8 *La couche F1*

En été, pendant des années d'activité solaire minimale, la fréquence maximale observée (MOF) pour la couche F1 dépasse souvent la MOF pour la couche F2 sur des trajets de propagation polaires de 2000 à 3500 km de longueur [Hunsucker et Bates, 1969]. Cela provient de ce que, au moins le matin, la foF2 décroît plus vite que la foF1 lorsqu'on se dirige vers les latitudes élevées. Ducharme et autres [1971] ont proposé une méthode de prévision de la couche F1 utile pour les prévisions de propagation radioélectrique (voir le Rapport 340).

4. La région E aux latitudes élevées

Aux latitudes élevées, comme ailleurs, le Soleil donne naissance à une région E lorsqu'il est au-dessus de l'horizon mais, dans la même gamme d'altitudes, l'ionisation est également due à la précipitation de particules énergétiques, surtout des électrons. Les couches dues à des précipitations présentent une importance particulière lors de l'hiver polaire, saison où la couche E d'origine solaire disparaît.

4.1 *La couche E aurorale ou «nocturne»*

La couche E aurorale (Ea), ou couche E nocturne, paraît, d'après les ionogrammes, ressembler beaucoup à la couche E d'origine solaire, à cela près que sa trace est toujours légèrement diffuse. Etant donné que ses variations sont lentes et qu'elle entoure presque tout le temps l'ovale auroral, c'est une couche réfléchissante utile et on la prend en considération au moins partiellement dans les prévisions ionosphériques normales. La fréquence de pénétration foEa peut atteindre 5 MHz, mais elle est plus couramment de 2,5 MHz. Dans un modèle suggéré par Wagner [1972] et représenté sur la Fig. 6, la couche E aurorale (Ea) forme une ceinture de 4° à 5° de largeur, son bord situé du côté du pôle étant au centre de l'ovale. Dans cette ceinture, la foEa est supérieure à 2 MHz et son maximum est voisin du bord situé du côté de l'équateur. En période d'activité magnétique, la largeur de la ceinture atteint 7°. En période calme, la foEa maximale est de 2,5 MHz pour une hauteur virtuelle de 130 km; en période active, la foEa maximale est de 4 MHz et la hauteur virtuelle est inférieure à 110 km. La probabilité d'occurrence est de 92 à 95%. D'après Gassmann [1970], la couche E aurorale apparaît moins fréquemment en fin d'après-midi et en début de soirée. Dans la partie éclairée, la couche E aurorale ne représente qu'un renforcement insignifiant de la couche E d'origine solaire.

4.2 *La couche E sporadique*

Aux latitudes élevées, la plus grande partie de l'ionisation E sporadique (Es) est du type auroral. Son altitude est comprise entre 90 et 130 km et elle est ordinairement transparente. Elle ne donne lieu à aucun retard et présente des variations importantes et rapides (la foEs peut atteindre 15 MHz). Son utilisation pour les radiocommunications se heurte à des évanouissements rapides et à la propagation par trajets multiples. L'apparition de la couche E sporadique est en corrélation avec la présence d'arcs auroraux discrets, aussi la trouve-t-on surtout dans l'ovale auroral. La Fig. 7 représente un schéma de sa distribution. La couche E sporadique aurorale à fréquence de pénétration élevée est associée aux sous-orages. Elle est plus rare en hiver qu'en été; d'après Gassmann [1972], l'occurrence de ces deux phénomènes est dans le rapport de 1 à 1,6, mais c'est en hiver qu'elle présente le plus d'intérêt pour les radiocommunications. Hunsucker et Bates [1969] ont signalé qu'elle est surtout importante pour les radiocommunications en période d'activités solaire minimale, moment où l'ionisation sporadique de la couche E peut se manifester pendant plus de 50% du temps sur des trajets entre l'Alaska et le Groenland ou la Norvège, avec des MOF généralement de l'ordre de 16 à 18 MHz. Il semble que le taux d'occurrence soit plus élevé dans le secteur du Canada et de l'Alaska que dans celui de la Sibérie (respectivement 80% et 60% en été, d'après Gassmann [1972]).

4.3 *La couche E sporadique dans la calotte polaire*

La couche E sporadique à l'intérieur de la calotte polaire ne présente pas les mêmes caractéristiques que la couche Es aurorale. Elle est en effet nettement plus faible et elle présente une corrélation négative avec l'activité géomagnétique. Elle s'étend sous forme de bandes ou de rubans à travers la calotte polaire, en gros dans la direction du Soleil, et il lui arrive d'être associée à de faibles émissions optiques d'aurores infravisibles.

5. La région D et l'absorption radioélectrique

La région D ne réfléchit pas les ondes radioélectriques de fréquences supérieures à celles des ondes kilométriques, mais elle les absorbe car la fréquence de collision des électrons neutres y est élevée. Etant donné qu'il existe une étroite relation entre la densité électronique dans la région D et l'absorption de l'énergie radioélectrique, c'est par ses propriétés d'absorption que nous décrirons cette région.

On distingue essentiellement deux catégories de phénomènes d'absorption: l'absorption aurorale, due aux électrons qui précipitent aux latitudes aurorales et l'absorption dans la calotte polaire, due aux protons qui précipitent dans la totalité de la région polaire.

Les variations de l'absorption peuvent être mesurées au moyen de «riomètres», en prenant comme source le bruit radioélectrique galactique. Les riomètres fonctionnent généralement à une fréquence d'environ 30 MHz et utilisent des antennes directives à orientation polaire ou verticale [Hargreaves, 1969]. On considère qu'une absorption de 1 dB mesurée par riomètre à 30 MHz est importante car elle se traduit, sur un circuit à ondes décamétriques, par une absorption de 10 dB ou plus selon l'obliquité et la fréquence [Agy, 1970]. On a également fait des mesures d'absorption sur des circuits ionosphériques à ondes métriques à prodiffusion [Bailey, 1964]. Les variations en fonction de la fréquence de l'absorption aurorale et de l'absorption dans la calotte polaire dépendent de certaines conditions. A des fréquences suffisamment élevées l'absorption varie comme $1/f^2$; en-dessous d'une fréquence limite déterminée, elle est constante. Cette fréquence limite dépend de l'obliquité du trajet et se trouve dans la bande inférieure des ondes décamétriques pour l'absorption aurorale et dans la bande supérieure des ondes décamétriques pour l'absorption dans la calotte polaire. Dans la bande des ondes kilométriques et aux fréquences inférieures l'absorption devient moins importante (voir le § 9).

5.1 *L'absorption aurorale*

L'absorption aurorale est un phénomène de sous-orage, lié à l'occurrence des aurores visibles et des perturbations magnétiques. Son schéma d'occurrence (contrairement à celui des phénomènes qui intéressent la calotte polaire) est zonal, avec une largeur statistique de 5 à 8° de latitude pour une zone d'absorption gaussienne [Hargreaves et Cowley, 1967]. En un lieu donné, on observe des phénomènes d'absorption pendant des durées allant généralement d'une minute à plusieurs dizaines de minutes. L'absorption présente deux maximums, l'un vers minuit, l'autre le matin. Vue d'un lieu donné, l'absorption de minuit se présente sous forme d'événements brefs et intenses directement associés à l'aurore locale de type sous-orageux. L'absorption du matin commence environ une heure après un sous-orage et elle est plus étendue dans le temps et dans l'espace. Elle n'est pas associée à l'aurore locale.

La Fig. 8 montre les pourcentages du temps pendant lesquels l'absorption dépasse 1 dB. La région où se produit l'absorption de minuit n'y apparaît pas car les événements sont brefs. Cependant, si, comme dans la Fig. 9, on représente l'intensité médiane d'événements individuels, le maximum de l'absorption de minuit apparaît. Des graphiques de cette sorte laissent supposer que la longitude n'intervient pas, mais les travaux d'Agy [1975] ont indiqué une certaine influence de la longitude sur l'absorption, avec un maximum au-dessus de l'Alaska et peut-être aussi au-dessus de l'Europe septentrionale. Au fur et à mesure que le niveau d'activité magnétique augmente, la zone d'absorption se déplace vers l'équateur atteignant la latitude géomagnétique 60° lorsque l'indice K_p est de l'ordre de 7.

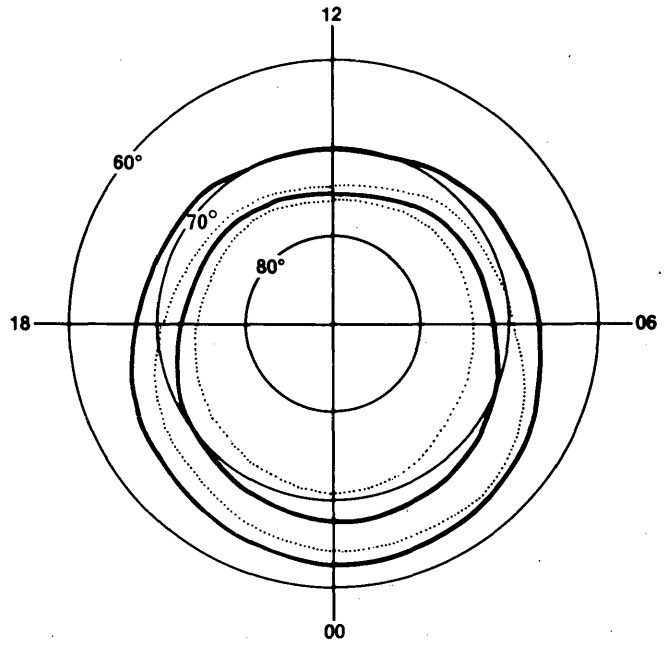


FIGURE 6 – *Modèle de distribution de la couche E aurorale pour une activité magnétique modérée (Q = 3) [Wagner, 1972]*

La région au-dessus de laquelle la fréquence de pénétration dépasse 2 MHz est délimitée par les courbes en gros traits. Coordonnées: latitude et temps géomagnétiques. La fréquence de pénétration maximale de 3,2 MHz se présente, dans cette région, aux environs de sa frontière de basse latitude. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

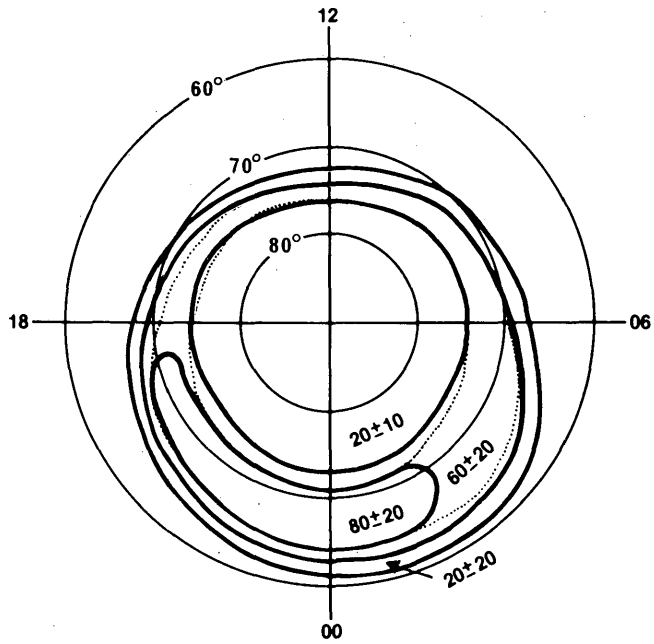


FIGURE 7 – *Modèle de distribution de la couche E sporadique aurorale pour une activité magnétique modérée (Q = 3) [Buchau et autres, 1972]*

Les valeurs inscrites auprès des lignes tracées en gros traits indiquent le pourcentage d'occurrence de la couche E sporadique aurorale. Coordonnées: latitude et temps géomagnétiques. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

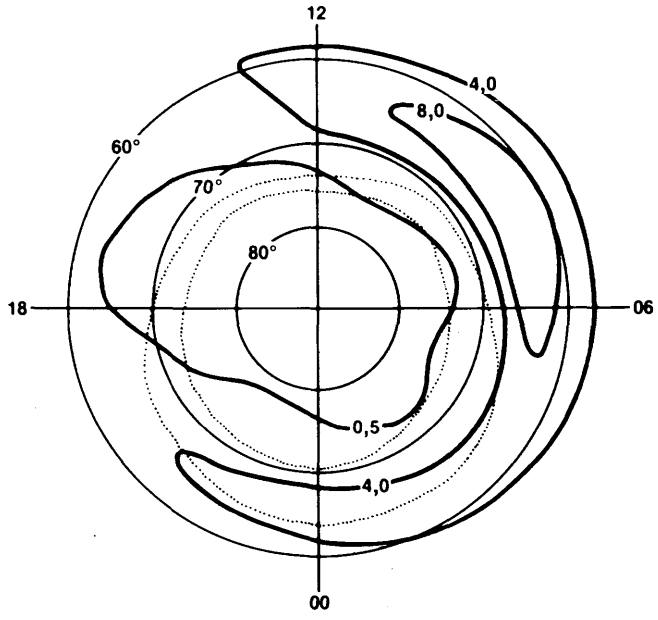


FIGURE 8 – *Pourcentage du temps pendant lequel l'absorption aurorale a été d'au moins 1 dB [Hartz et autres, 1963]*

Coordonnées: latitude et temps géomagnétiques. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

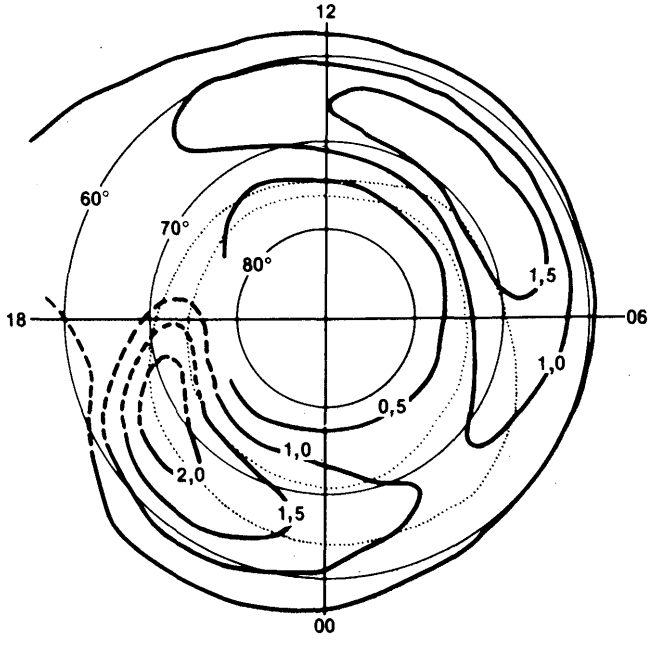


FIGURE 9 – *Valeur médiane des événements d'absorption aurorale, en dB [Hargreaves et Cowley, 1967]*

Coordonnées: latitude et temps géomagnétiques. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

Il n'est pas habituel qu'il y ait de l'activité au même moment dans la totalité de la zone d'absorption, car le schéma général fait apparaître à la fois des mouvements en latitude et en longitude. Dans le secteur de nuit, il apparaît que des régions d'absorption se déplacent aussi bien en se rapprochant du pôle qu'en s'en éloignant [Hargreaves, 1974], bien que, au début d'un sous-orage, le mouvement soit toujours en direction du pôle aux latitudes élevées et généralement en direction de l'équateur aux basses latitudes, l'origine se trouvant au voisinage de la latitude géomagnétique 65° [Jelly, 1970]. En longitude, le début du sous-orage se propage à la fois vers l'Est et vers l'Ouest du secteur de nuit, pour apparaître dans le secteur de jour de la zone 30 à 60 minutes plus tard [Jelly et Brice, 1967; Hargreaves, 1968]. Berkey et autres [1974], Joulina et autres [1983] ont donné des représentations d'ensemble du comportement des sous-orages.

Les électrons énergétiques responsables de l'absorption proviennent directement de la queue de la magnétosphère à la suite d'un sous-orage, ou de la ceinture extérieure de Van Allen. L'énergie que doit posséder un électron pour contribuer à l'absorption peut se situer dans une très large gamme, mais la gamme de 40 à 80 keV présente une importance particulière [Penman et autres, 1979]. D'après des mesures faites par fusées, l'altitude du maximum d'absorption est de 90 à 95 km la nuit et d'environ 75 km le jour. L'épaisseur de la couche absorbante est de 15 à 20 km [Hargreaves, 1969].

5.2 *Augmentation de l'absorption après les orages géomagnétiques (effet après orage)*

On observe régulièrement une absorption accrue dans la région D après les orages géomagnétiques, depuis les latitudes subaurorales (latitude invariante $\leqslant 62°$) jusqu'aux latitudes moyennes (latitude invariante $\simeq 45°$). L'absorption accrue dans cette ceinture est distincte de la zone d'absorption aurorale et est causée par la précipitation d'électrons énergétiques à partir de la ceinture de rayonnement [Wagner et Ranta, 1983].

La zone d'absorption accrue commence à se développer peu après la phase principale de l'orage et continue d'exister pendant toute la phase de récupération, c'est-à-dire pendant une période qui peut atteindre 10 jours ou plus. L'amplitude et la durée de l'augmentation de l'absorption sont en corrélation étroite avec l'indice D_{st} [Lauter et autres, 1977], mais dépendent aussi de la polarité du champ magnétique interplanétaire [Lauter et autres, 1977, 1978]. Au début de la phase de récupération après un orage géomagnétique, le bord de la ceinture côté pôle se situe entre 55° et 58° de latitude invariante en Europe et se déplace lentement en direction du pôle pour atteindre une latitude invariante d'environ 62° à la fin de la phase de récupération [Wagner et autres, 1982].

5.3 *L'absorption dans la calotte polaire*

Les événements d'absorption dans la calotte polaire (PCA), souvent appelés événements solaires à protons (SPE), sont dus à des éruptions solaires de rayons X lors desquelles sont émis des protons énergétiques (plusieurs MeV) qui atteignent la Terre. L'absorption se produit entre environ 45 et 75 km d'altitude [Hargreaves, 1969]. L'absorption subie par les ondes décamétriques peut dépasser 100 dB. L'occurrence d'une telle éruption peut être annoncée par une PIDB (perturbation ionosphérique à début brusque), événement bref se produisant sur la face éclairée de la Terre, à toute latitude, et provoqué par les rayons X issus de l'éruption; l'absorption du type PCA peut survenir de 15 minutes à plusieurs heures plus tard, ce délai représentant la durée du trajet des protons depuis le Soleil jusqu'au voisinage de la Terre. Alors que la PIDB n'est pas un phénomène prévisible, on a de bonnes chances de pouvoir prévoir l'occurrence, l'instant du début et l'importance d'une PCA dès qu'une éruption a été observée [Cliver et autres, 1978; Akinyan et Chertok, 1980; Akinyan et autres, 1980]. Contrairement aux rayons X, les protons sont guidés par le champ magnétique terrestre et n'apparaissent qu'aux latitudes supérieures à 60° environ, que la zone soit éclairée ou non. Il est à noter que la zone dans laquelle se produit le phénomène d'absorption dans la calotte polaire est d'ordinaire plus vaste que la «calotte polaire» telle que nous l'avons définie au § 2.2. Cependant, l'absorption dans la partie éclairée de la calotte polaire est environ 4 fois plus forte (à 30 MHz) que dans la partie obscure, où les électrons restent en grand nombre immobilisés par attachement à des molécules d'air avec lesquelles ils forment des ions négatifs. Selon la phase du cycle solaire, il peut y avoir jusqu'à 14 PCA par an [Collins et autres, 1961]. La PCA dure en moyenne 2 jours, mais elle peut se prolonger jusqu'à 4 jours. Bailey [1964] a fait un recensement des PCA qui ont eu lieu de 1952 à 1963; il a enregistré les événements ayant donné lieu, de jour, à une absorption au moins égale à 2,5 dB mesurée au moyen d'un riomètre à 30 MHz à 70° de latitude magnétique, ou à 20 dB sur une liaison par diffusion de 1575 km sur 32,2 MHz ayant son point de diffusion à la même latitude. Les résultats de ces travaux sont consignés dans le Rapport 263. Pour résumer ces données, on peut dire que le nombre mensuel d'heures (N) d'absorption dans la calotte polaire est donné approximativement par $N = -70 + 4{,}4\ R$, R étant la moyenne glissante du nombre de taches solaires de Zurich. Pour l'année la plus défavorable parmi celles sur lesquelles a porté l'enquête, N a atteint la valeur de 780 heures, ce qui représente environ 9% de l'année. L'absorption étant fortement réduite pendant les heures d'obscurité, un circuit donné ne sera interrompu que pendant une fraction du temps inférieure à la valeur précitée. Zmuda et Potemra [1972] ont dressé un tableau des événements ayant eu lieu de 1965 à 1969. Larsen [1974] a donné une représentation de ceux qui ont eu lieu de 1965 à 1973.

Des orages magnétiques se produisent de 20 à 60 heures après une éruption importante. Si une PCA n'est pas terminée au moment où un orage commence, l'absorption peut s'étendre aux latitudes plus basses, jusque vers 55°, en raison d'une déformation du champ géomagnétique. On a observé que l'absorption du type PCA augmente à peu près au moment où débute l'orage, puis qu'elle diminue pendant une heure ou davantage [Holt et Landmark, 1964; Lied, 1967].

5.4 *Effets de l'absorption sur les circuits radioélectriques*

Pendant d'importants phénomènes d'absorption, les ondes décamétriques peuvent subir un affaiblissement ou une interruption totale, selon leur trajet et selon la gravité de la perturbation. En règle générale, les trajets de propagation qui traversent la zone d'absorption aurorale sont affectés par les orages et les sous-orages, alors que ceux qui restent à l'intérieur de la calotte polaire ne sont affectés que par les événements du type PCA. Un tel événement affectant de préférence la gamme inférieure des ondes décamétriques tandis que les ondes plus courtes sont davantage affectées par les perturbations de la région F provoquées par les orages, une méthode judicieuse de gestion des fréquences consiste à utiliser une fréquence élevée pendant le phénomène d'absorption et une fréquence basse pendant l'orage qui le suit [Herman et Penndorf, 1964]. Lied [1967] et Hunsucker et Bates [1969] ont présenté d'autres suggestions portant sur un réacheminement du trafic écoulé sur ondes décamétriques en cas de phénomènes d'absorption.

Les circuits à ondes métriques exploités par diffusion ionosphérique sont, pour la plupart, affectés non par l'absorption aurorale mais uniquement par l'absorption dans la calotte polaire [Bailey, 1964]. Cela provient, pense-t-on, de ce que les niveaux où se produit la diffusion sont situés à des altitudes inférieures à celles généralement affectées par les précipitations aurorales. Dans leur partie éclairée par le Soleil, ces circuits sont affectés par l'absorption lors d'événements du type PCA. Cependant, dans l'obscurité, les niveaux des signaux sont souvent plus élevés qu'en l'absence d'événements du type PCA, par suite de l'augmentation de la densité électronique aux niveaux où se produit la diffusion.

6. Propagation des ondes décamétriques dans l'ionosphère polaire irrégulière

L'ionosphère de la calotte polaire, essentiellement due à une ionisation en provenance de l'hémisphère éclairé par le Soleil, est d'ordinaire, pour les ondes décamétriques, un meilleur réflecteur que l'ovale qui l'entoure. Elle est cependant moins régulière que la couche F de latitude moyenne; elle l'est même beaucoup moins lorsqu'elle se trouve dans l'obscurité. Du point de vue de la propagation des ondes décamétriques, l'ionosphère associée à l'ovale auroral est la plus irrégulière de toutes, vu ses grandes variations dans le temps et dans l'espace. La limite de l'ovale du côté de l'équateur correspond approximativement au bord polaire du creux ionosphérique. Le creux ionosphérique peut donner lieu à de forts gradients horizontaux de la densité électronique.

6.1 *Gradients horizontaux*

Des gradients horizontaux peuvent produire des déviations azimutales des trajets par rapport à la direction du grand cercle. Ces variations peuvent atteindre 10° à 20° [Millman, 1978], la déviation étant maximale lorsque le trajet de propagation est tangent à l'ovale auroral. La diffusion sur des irrégularités peut elle aussi donner lieu à des modes de propagation hors du plan du grand cercle. La réfraction azimutale risque de provoquer des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, auquel cas la réception sur des antennes directives se révèle inefficace. En été, dans le Nord, les modes de propagation ionosphérique normaux dominent, mais en hiver dans le Nord, ce sont les modes de propagation hors du grand cercle [Lomax, 1972].

Les gradients d'ionisation le long du trajet ont pour effet de rendre asymétrique le trajet entre l'émetteur et le récepteur; le point de réflexion est décalé vers une région de plus forte densité et la fréquence maximale observée (MOF) effective s'en trouve augmentée.

6.2 *Prévisions de la couche F*

Buchau [1972] a fait observer que l'on ne saurait se fonder sur les conditions de l'ionosphère moyenne pour prévoir avec précision les conditions – même moyennes – de la propagation dans l'ionosphère aux latitudes élevées car, ce faisant, on élimine généralement les variations brusques du gradient de la densité électronique. Cela est particulièrement le cas en hiver, saison où la distribution de la densité électronique est caractérisée par des variations importantes et irrégulières.

6.3 *Variations rapides dans le temps*

L'ionosphère aurorale est d'une grande variabilité, due en grande partie aux sous-orages. Tous les paramètres de la propagation sont susceptibles de varier rapidement sous l'effet d'un sous-orage auroral. C'est notamment le cas de l'absorption dans la région D et de l'ionisation sporadique de la région E.

6.4 *Etalement des signaux en fréquence et dans le temps*

Les irrégularités de l'ionosphère polaire sont généralement en mouvement, si bien que les signaux réfléchis par l'ionosphère sont sujets à des décalages de fréquence par effet Doppler. Basler et autres [1973] ont trouvé des vitesses de vents ionosphériques dans la calotte polaire comprises entre 0,5 et 1 km/s. L'irrégularité de la surface de l'ionosphère donne également lieu à une propagation par trajets multiples et à un étalement du temps de propagation.

Pour les trajets suivant l'arc de grand cercle, l'étalement en fréquence ne diffère guère de ce qu'il est aux latitudes moyennes, soit de 0,1 à 0,5 Hz. Pour les trajets qui s'écartent du grand cercle, cet étalement est en revanche de 5 à 10 Hz [Lomax, 1972]. Basler et autres [1973] citent des valeurs de 2 Hz lorsque l'ionosphère est calme et de 3,5 Hz lorsqu'elle est perturbée. Ils ont également observé des événements se produisant au rythme d'environ 2 par heure, au cours desquels la fréquence reçue dérivait d'environ 2 Hz par minute pendant quelques minutes. Hunsucker et Bates [1969] ont enregistré un spectre typique dont la largeur était d'environ 8 Hz. Pour le temps de propagation, l'étalement était de 100 à 200 μs pour les trajets suivant l'arc de grand cercle et d'une à 2 ms pour ceux qui s'en écartent [Lomax, 1972].

Les signaux transmis en modulation d'amplitude sont fréquemment mutilés du fait d'interférences destructives entre les deux bandes latérales. Les émissions à bande latérale unique (BLU) et à ondes entretenues pures sont moins atteintes [Hunsucker et Bates, 1969].

6.5 *Evanouissements*

Sur les trajets de propagation par la région F dans la région polaire, on constate presque invariablement des évanouissements dus aux irrégularités de cette région. Hunsucker et Bates [1969] signalent une largeur de bande de corrélation des évanouissements supérieure à 1 kHz pendant 90% du temps. Les trajets qui passent au voisinage du bord de l'ovale situé du côté du pôle, surtout dans le secteur «midi», risquent d'être les plus affectés.

6.6 *Polarisation*

Aux latitudes élevées, où le champ magnétique est presque vertical les ondes se propageant selon le mode X ont une polarisation horizontale pour une incidence presque rasante. Puisque les ondes qui se propagent selon le mode X sont fortement absorbées, les antennes verticales pour ondes décamétriques, recevant les ondes qui se propagent selon le mode O, devraient théoriquement présenter un avantage sur les antennes horizontales. Une étude de l'adaptation de la polarisation à l'ionosphère a été faite par Davies [1969]. En pratique, cet avantage ne semble pas avoir été constaté et, par commodité, on utilise généralement des doublets horizontaux dont l'emploi s'avère satisfaisant.

6.7 *Modes de propagation à deux bonds*

Les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique sont des réflecteurs particulièrement médiocres de l'énergie radioélectrique [Hunsucker et Bates, 1969]. Il en résulte que les trajets à plusieurs bonds au-dessus de ces calottes glaciaires sont sujets à des affaiblissements de propagation plus grands que tout autre trajet de propagation à plusieurs bonds. Les irrégularités du terrain et les grandes variations des propriétés électriques du sol dans les régions à latitude élevée comme l'Alaska peuvent aussi provoquer une augmentation de l'affaiblissement du signal au point de réflexion sur le sol [Hunsucker, 1983].

7. Diffusion due aux irrégularités de la densité électronique

Les irrégularités de la densité électronique dans l'ionosphère diffusent les ondes radioélectriques dans une large gamme de fréquences allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques. Dans le cas de transmissions obliques à ondes décamétriques, on a observé une rétrodiffusion s'étendant jusqu'à des altitudes correspondant à la région F, c'est-à-dire 300-400 km, ainsi que dans la région E [Malik et Aarons, 1964; Bates et Albee, 1970]. La rétrodiffusion due aux irrégularités dans la région F et dans la région E aurorale est sensible à l'orientation, la réflectance maximale se produisant lorsque la direction de la propagation est normale aux lignes de force du champ magnétique. La diminution, fonction de l'orientation, de la section droite des signaux rétrodiffusés dans la région F dans la bande comprise entre 6 et 15 MHz semble être de l'ordre de 5 dB par degré d'écart par rapport à la ligne de force du champ magnétique [Bates et Albee, 1970].

La diffusion par l'ionisation aurorale des ondes métriques et décimétriques se limite habituellement à des altitudes d'environ 110 km dans la région E [Leadabrand et autres, 1965; Abel et Newell, 1969]. Toutefois, on a détecté une rétrodiffusion aurorale à 106 MHz à des altitudes de l'ordre de 300 km [Schlobohm et autres, 1959]. En se fondant sur la diffusion radioélectrique par l'ionisation aurorale qui se produit dans la gamme de fréquences de 50 à 3000 MHz, Chesnut [1972] a constaté que:

- la sensibilité à l'orientation est pratiquement indépendante de la fréquence,
- la section droite de la diffusion diminue d'environ 10 dB par degré de l'angle d'orientation,
- la section droite de la diffusion varie de façon exponentielle en fonction de la fréquence, à raison de 33 dB/1000 MHz en moyenne, et
- il existe une corrélation spatiale modérée entre l'aurore radioélectrique et l'aurore visible.

Chesnut [1972] a présenté une analyse exhaustive de la diffusion aurorale radioélectrique des ondes métriques et décimétriques.

On admet que les réflexions dues à l'aurore radioélectrique se produisent là où la densité électronique produite par l'aurore et le champ électrique (vitesse de dérive) sont suffisants pour déclencher la formation d'ondes ion-acoustiques. Cela implique que les échos sont associés à des courants dans la région E, et notamment à l'électrojet auroral. C'est la structure des ondes ion-acoustiques qui fait que le phénomène ne saurait se prêter à une description uniforme.

Les signaux réfléchis par une aurore radioélectrique sont sujets à un étalement de fréquence par effet Doppler considérable et la corrélation de leur amplitude disparaît en très peu de temps [Leadabrand et autres, 1965]. On a utilisé de tels échos pour des communications sur ondes métriques [Lange-Hesse, 1968], mais des évanouissements se produisent à quelques centaines de Hz et la voix est déformée par un grognement ou un sifflement caractéristiques. La géométrie du trajet doit permettre une réflexion spéculaire sur des surfaces parallèles au champ magnétique, mais, même si cette géométrie est correcte, les communications sont impossibles pendant une grande partie du temps.

Le phénomène de l'aurore radioélectrique est sans doute plus important lorsqu'on le considère comme une source de brouillage possible des émissions sur ondes métriques due à la diffusion de signaux non désirés provenant d'émetteurs éloignés. En ondes métriques, de tels brouillages sont sans importance pour les liaisons de faible puissance, mais ils risquent de donner lieu à un fouillis d'échos avec les radars de grande puissance, pour les directions dans lesquelles la condition d'orthogonalité magnétique est satisfaite.

Sur les liaisons à ondes métriques, il arrive que l'on observe de sérieux renforcements des signaux transmis par réflexion sur la couche E sporadique, mais ces signaux sont généralement fluctuants et présentent des évanouissements profonds et fréquents. Les liaisons à ondes décimétriques par diffusion troposphérique risquent d'être surchargées par des signaux intenses ayant subi une réflexion spéculaire.

8. Propagation transionosphérique

La propagation transionosphérique prend de plus en plus d'importance à mesure qu'augmente le trafic échangé entre la Terre et ses satellites artificiels. Les émissions des satellites géostationnaires traversent l'ionosphère polaire sous un faible angle d'incidence, aussi rencontrent-elles une ionisation plus importante que si elles traversaient l'ionosphère à la verticale. Pour un exposé plus général sur cette propagation, on se reportera au Rapport 263.

8.1 *Scintillations des signaux transionosphériques*

Les scintillations dont sont affectés les signaux qui traversent l'ionosphère sont dues avant tout à des irrégularités de la région F alignées selon les lignes de force du champ magnétique. Aarons [1973] a examiné leur distribution et leur occurrence et Liszka [1972] a passé en revue leurs caractéristiques. Pope [1974] et Singleton [1980] ont élaboré des modèles numériques de la distribution des scintillations. Diverses méthodes d'appréciation des dimensions des irrégularités responsables des scintillations ont conduit à des valeurs de l'ordre de 0,4 à 3 km. Un phénomène appelé «évanouissement de visibilité d'une étoile radioélectrique» est dû à des irrégularités plus petites, dont les dimensions sont de l'ordre d'une centaine de mètres. Les altitudes mesurées se situent toutes entre 200 et 500 km. En régime perturbé, les variations relatives de densité ont été évaluées entre 10 et 40%. Aux latitudes aurorales, l'indice de scintillation varie à peu près du simple au double lorsque l'indice K_p passe de 0 à 4. Le taux de scintillation peut atteindre 50 Hz pendant les périodes de fortes perturbations ionosphériques. On a publié deux études sur la morphologie mondiale des mécanismes de scintillation et de diffusion ionosphérique [Yeh et Liu, 1982; Aarons, 1982].

Les scintillations se manifestent dans toute l'ionosphère polaire, du côté du pôle par rapport à une frontière qui est représentée sur la Fig. 10. Elles sont plus prononcées la nuit que le jour. Clark et Raitt [1975], d'après des mesures directes de distribution des irrégularités à l'aide d'instruments embarqués à bord de satellites, font état de variations supérieures à 10%. Les résultats qu'ils ont obtenus concordent en général avec ceux d'Aarons [1973], sauf qu'ils ont trouvé que la frontière du côté des basses latitudes présente la nuit une discontinuité par rapport à ce qu'elle est de jour. Mais ces frontières sont des moyennes et la variabilité d'un jour à l'autre est grande. De plus, les distributions de l'intensité et du taux d'occurrence ne sont pas uniformes à l'intérieur de la région.

Martin et Aarons [1977], utilisant des émissions à 136 MHz pour la plupart à faible angle de site, ont trouvé que les scintillations les plus intenses sont celles qui affectent les trajets de propagation traversant les aurores. Les mesures faites par Frihagen et Jacobsen [1971] au moyen de fusées ont également mis en évidence de fortes variations de la densité électronique juste à la limite des zones d'aurore en direction du pôle. Cependant, Buchau et autres [1978], en contrôlant des signaux émis d'aéronefs à la fréquence 250 MHz et reçus sous des angles de site élevés, ont constaté que, au moins en période d'activité magnétique calme à modérée, les scintillations les plus intenses se produisent dans la calotte polaire. Ils ont cependant observé que c'est près de la frontière de l'ovale auroral située du côté du pôle que le taux d'occurrence des scintillations est le plus élevé (au moins le double de ce qu'il est près de la frontière opposée). Une aurore discrète incluse dans l'aurore diffuse – phénomène que l'on observe dans la moitié de l'ovale située du côté de l'équateur – n'affectait en rien les signaux.

Des scintillations peuvent également se produire dans la couche E, mais elles sont souvent masquées par celles de la couche F, qui sont plus intenses. Lorsque l'on mesure les amplitudes des signaux, plutôt que leurs phases, on a tendance à favoriser la couche F car, comme elle est plus éloignée du récepteur, les variations d'amplitude y sont plus développées [Forsyth, 1972].

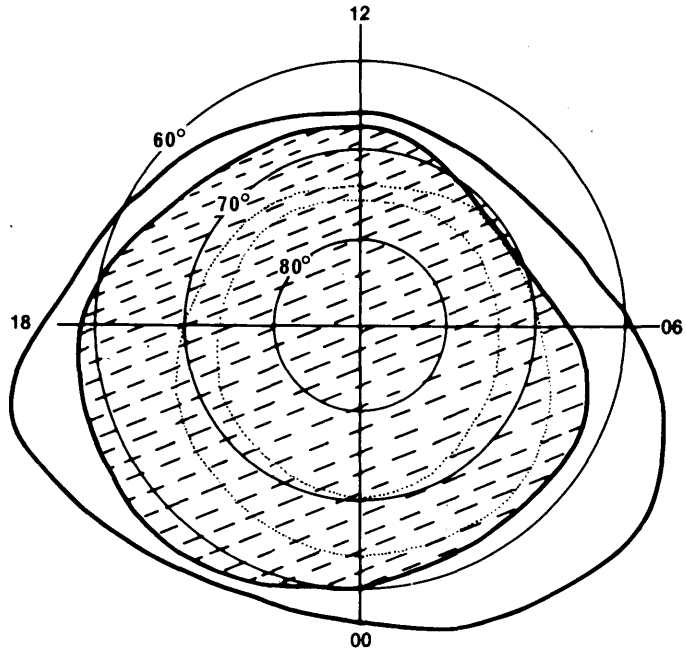


FIGURE 10 — *Distribution des irrégularités de la couche F donnant lieu à des scintillations [Aarons, 1973]*

La région intérieure (en tirets) correspond à une activité magnétique calme (K_p = 0,1) et la région extérieure à une activité intense (K_p = 5). Coordonnées: latitude invariante (à 350 km) et temps moyen local. Les frontières de l'ovale auroral (Q = 3) sont représentées par les courbes en pointillés.

8.2 *Temps de propagation des signaux transionosphériques*

Sur les trajets transionosphériques, le temps de propagation, qui dépend du contenu électronique total, peut être important. Par exemple, sur un trajet aboutissant à un satellite placé sur une orbite polaire, il peut y avoir de rapides variations de phase du fait d'importants gradients horizontaux de la densité électronique. On peut dans certains cas admettre que les variations du contenu électronique total suivent celles de la densité maximale de la couche F: par exemple, ce contenu présente un creux qui correspond à celui de la couche F.

Il est cependant probable qu'il y a d'énormes variations au niveau d'autres paramètres tels que l'épaisseur équivalente, définie comme le rapport du contenu total à la densité maximale. Cette épaisseur, dans la région non éclairée, est vraisemblablement beaucoup plus faible qu'aux latitudes moyennes car l'ionisation de la partie supérieure de l'ionosphère s'échappe le long des lignes de force non refermées du champ magnétique. Toute source de chauffage située dans l'ionosphère supérieure, lumière solaire ou précipitation d'électrons de faible énergie par exemple, augmentera cette épaisseur. Au cours de phénomènes auroraux intenses, une bonne partie de l'ionisation contenue dans une colonne verticale peut se situer au-dessous de la couche F. Le contenu électronique varie en fonction de l'activité des sous-orages d'une manière complexe, selon la saison et l'instant du début de cette activité [Mikkelsen et Dangaard, 1976].

9. Effets sur les ondes kilométriques et myriamétriques

Les principaux facteurs dont dépend la propagation ionosphérique des ondes kilométriques à des latitudes élevées, sont la couche E-sporadique pendant la nuit et la réflexion et l'absorption dans la région D pendant le jour. Bien que qualitativement, les effets puissent être similaires à ceux observés avec les ondes décamétriques, il y a des différences marquées. Dans la gamme des ondes kilométriques, l'absorption diminue quand la longueur d'ondes augmente et que le gradient de hauteur de densité électronique à la base de l'ionosphère où les ondes sont réfléchies, augmente. C'est ainsi qu'en cas de graves perturbations, causées par exemple par une éruption solaire à rayons X, l'absorption des ondes décamétriques augmente sensiblement, alors que la hauteur de réflexion et l'absorption des ondes kilométriques diminuent. Il y a une diminution correspondante du temps de propagation de phase du signal traversant la région. Les ondes kilométriques sont utiles sur des distances supérieures à environ 3000 km pour des communications entre points fixes, étant donné que les graves perturbations causées aux circuits à ondes décamétriques dans les régions arctiques n'ont que de faibles conséquences sur les amplitudes du signal des ondes kilométriques [Belrose, 1968 et Bury, 1964].

En ondes myriamétriques, l'absorption de l'onde ionosphérique est faible mais d'importantes variations de phase affectent l'utilisation de ces ondes pour les systèmes de navigation et de localisation. Les précipitations ionisantes dans la région D ont pour effet de réduire la hauteur virtuelle de l'ionosphère à l'intérieur des régions polaires, ce qui entraîne alors une avance de la phase de tout signal traversant ces régions. Les effets des précipitations aurorales d'électrons ont été décrits par Belrose [1968], Westerlund et Reder [1973a], Larsen [1974], Kikuchi et Evans [1983] et par Kikuchi et autres [1983]. Même pendant les périodes calmes, la hauteur de réflexion des ondes myriamétriques la nuit, dans la zone aurorale, est de l'ordre de 80 km, c'est-à-dire nettement inférieure à ce qu'elle est aux latitudes moyennes et basses (85 à 90 km). Pour les signaux qui traversent la latitude des précipitations de particules aurorales, il se produit des anomalies de la propagation des ondes myriamétriques mais leur corrélation avec les variations du riomètre et les variations magnétiques n'est pas bonne. Ces effets sont en général plus intenses la nuit que le jour car, à ces latitudes, seule une faible proportion des électrons précipités a une énergie suffisante pour pénétrer au-dessous des hauteurs de réflexion normales de jour de la région D. Dans la gamme des latitudes magnétiques d'environ 60 à 65°, où il y a précipitation d'électrons d'énergie supérieure à 200 keV, les anomalies de propagation des ondes myriamétriques sont prononcées et se produisent à toute heure du jour avec une occurrence maximale pendant la soirée [Kikuchi et autres, 1983]. La corrélation avec l'absorption indiquée par le riomètre et les variations du champ magnétique est cependant faible, en raison notamment des différentes sensibilités des phénomènes observés par rapport aux précipitations de particules énergétiques et du caractère localisé des précipitations. Une corrélation étroite peut exister dans le cas d'expériences particulières; c'est-à-dire lorsqu'on choisit un trajet de façon que le mode dominant corresponde à l'onde ionosphérique réfléchie une seule fois, le riomètre et le magnétomètre étant placés près du milieu du trajet [Belrose, 1968]. Dans le cas de propagation à grande portée, on a constaté également une corrélation étroite entre l'absorption et les variations du champ magnétique pendant des variations du champ magnétique à l'échelle mondiale, par exemple au cours de sous-orages magnétosphériques [Kikuchi et Evans, 1983].

Les événements solaires à protons ont, de leur côté, des effets plus marqués, de grande portée et de longue durée. Un événement solaire à protons peut donner lieu à une diminution du temps de propagation de phase portant sur environ 1,5 cycle sur la fréquence 10 kHz [Kasper et Hutchinson, 1978]. Les événements commencent soudainement (temps de montée de 10 à 60 min) et diminuent lentement avec un retour à la normale sur plusieurs jours (jusqu'à deux semaines pour de forts événements affectant la propagation à des latitudes élevées). Cette diminution est généralement modulée par la variation diurne de la densité électronique de la région D [Larsen, 1974], mais la variation diurne, (c'est-à-dire la différence de la nuit au jour) est habituellement inférieure à la normale et a disparu entièrement au moins dans un cas [Belrose et Ross, 1962].

Les faibles conductivités du sol dans les régions arctiques ont aussi un effet marqué sur la propagation des ondes kilométriques et myriamétriques, en particulier si le trajet de propagation traverse le Groenland ou la calotte glaciaire de l'Antarctique. Les taux d'affaiblissement des signaux se propageant à travers la calotte glaciaire du Groenland sont de 1,3 dB/1000 km la nuit et 22 dB/1000 km le jour [Morfitt, 1977] (les taux d'affaiblissement normaux pour des trajets mixtes terre-mer pour les circuits qui ne traversent pas les calottes glaciaires sont respectivement de 2 dB/1000 km et de 3 dB/1000 km). Etant donné que les perturbations diurnes à protons aboutissent à un abaissement supplémentaire du niveau de la réflexion ionosphérique, les taux d'affaiblissement sont nettement supérieurs; on a mesuré des affaiblissements allant jusqu'à 30 dB pour des trajets traversant la calotte glaciaire de l'Antarctique [Crary et Crombie, 1972]. La structure du mode de propagation guidée peut également varier: on peut passer du mode transversal magnétique (TM) au mode transversal électrique (TE). La gravité des anomalies de propagation des ondes myriamétriques associée aux événements solaires à protons dépend énormément du fait que le trajet de transmission passe ou non au-dessus d'une calotte de glace. [Westerlund et Reder, 1973b].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AARONS, J. [1973] A descriptive model of F layer high-latitude irregularities as shown by scintillation observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 7441-7450.

AARONS, J. [1982] Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 360-378.

AARONS, J. et ALLEN, R. S. [1971] Scintillation boundary during quiet and disturbed magnetic conditions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 170-177.

ABEL, W. G. et NEWELL, R. E. [1969] Measurements of the afternoon radio aurora at 1295 MHz. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 231-245.

AGY, V. [1970] HF radar and auroral absorption. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1317-1324.

AGY, V. [1975] On the geographic distribution of auroral absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 681-685.

AKASOFU, S.-I. [1968] *Polar and magnetospheric substorms*, Springer-Verlag, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

AKASOFU, S.-I. [1974] The aurora and the magnetosphere: the Chapman memorial lecture, *Planet. and Space Sci.*, Vol. 22, 885-923.

AKASOFU, S.-I. [1977] *Physics of magnetospheric substorms.* D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

AKINYAN, S. T. et CHERTOK, I. M. [1980] Determination of PCA values using integral parameters of solar microwave flares. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 20, 192-196.

AKINYAN, S. T., CHERTOK, I. M. et JOULINA, E. M. [1980] Determination of PCA value from the characteristics of solar radio bursts. *Solar Terrestrial Predictions Proc.* III, Ed. R. F. Donnelly. D27 à D33, US Govt. Printing Office, Stock N° 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.

ALLEN, J. H., ABSTON, C. C., SALAZAR, J. E. et McKINNON, J. A. [1979] Auroral electrojet magnetic activity indices AE (11-12) for January-June 1975. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-73, NOAA, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.

BAILEY, D. K. [1964] Polar cap absorption. *Planet. and Space Sci.*, **12**, 495-541.

BASLER, R. P., SCOTT, T. D. et DUPUY, R. L. [1973] Irregularity motions in the polar ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 8, 745-751.

BATES, H. F. et ALBEE, P. R. [1970] Aspect sensitivity of F-layer HF backscatter echoes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 165-170.

BELROSE, J. S. [1968] Low and very low frequency radio wave propagation, AGARD Lecture Series XXIX, NTIS Accession N° AD676788, National technical information service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BELROSE, J. S. et ROSS, D. B. [1962] Observations of unusual LF propagation made during polar cap (PCA) events, *J. Phys. Soc.*, Japon, **17**, Supplement A-11 (International Conference on Cosmic Rays and the Earth Storm), 126-130.

BERKEY, F. T., DRIATSKIY, V. M., HENRIKSEN, K., HULTQVIST, B., JELLY, D. H., SCHUKA, T. I., THEANDER, A. et YLINIEMI, J. [1974] A synoptic investigation of particle precipitation dynamics for 60 substorms in IQSY (1964-65) and IASY (1969). *Planet. and Space Sci.*, Vol. 22, 255-307.

BRINTON, H. C., GREBOWSKY, J. M. et BRACE, L. H. [1978] The high latitude winter F-region at 300 km: thermal plasma observations from AE-C. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 4767-4776.

BUCHAU, J. [1972] Instantaneous versus averaged ionosphere. Arctic ionosphere modelling – five related papers, AFCRL-72-0305, 1-7. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

BUCHAU, J., AARONS, J, MULLEN, J. P., WEBER, E. J., WHALEN, J. A. et WHITNEY, H. E. [1978] Amplitude scintillation studies in the polar region on 250 MHz. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 17-24. Ed. John M. Goodman, US Govt. Printing Office 1978 0-277-182, Washington, DC 20402.

BUCHAU, J., GASSMANN, G. J., PIKE, C. P., WAGNER, R. A. et WHALEN, J. A. [1972] Precipitation patterns in the Arctic ionosphere determined from airborne observations. *Ann. de Géophys.*, Vol. 28, 443-453.

BUCHAU, J., REINISH, B. W., WEBER, E. J. et MOORE, J. G. [1983] Structure and dynamics of the winter polar cap F region, *Radio Sci.*, Vol. 18, 995-1010.

BURY, G. J. [1964] Military communications in the Canadian Arctic. *Arctic Communications*, 67-71, Ed. B. Landmark, AGARDograph 78, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.

CHESNUT, W. G. [1972] Polar propagation effects on VHF-UHF radars. *Radar Propagation in the Arctic.*, Ed. J. Frihagen, AGARD-CP-97, 5-1 à 5-38.

CHUBB, T. A. et HICKS, G. T. [1970] Observations of the aurora in the far ultraviolet from OGO 4. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1290-1311.

CLARK, D. H. et RAITT, W. J. [1975] Characteristics of the high-latitude ionospheric irregularity boundary, as monitored by the total ion current probe on ESRO-4. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 23, 1643-1647.

CLIVER, E. W., SECAN, J. A., BEARD, E. D. et MANLEY, J. A. [1978] Prediction of solar proton events at the Air Force Global Weather; Space Environmental Forecasting Facility. Effect of the ionosphere on space and terrestrial systems. Ed. John M. Goodman, US Govt. Printing Office 0-277-182, 393-400, Washington, DC 20402.

COLLINS, C., JELLY, D. H. et MATTHEWS, A. G. [1961] High-frequency radio-wave black-outs at medium and high latitudes during a solar cycle. *Can. J. Phys.*, **39**, 35-52.

CRARY, J. H. et CROMBIE, D. D. [1972] Antarctic ice cap attenuation rates of VLF signals determined from short and long great circle paths. *Radio Sci.*, Vol. 7, 233-238.

DAVIES, K. [1969] *Ionospheric Radio Waves.* Blaisdell, Waltham, MA, Etats-Unis d'Amérique.

DUCHARME, E. D., PETRIE, L. E. et EYFRIG, R. [1971] A method for predicting the F1 critical frequency. *Radio Sci.*, Vol. 6, 369-378.

EATHER, R. H. [1973] The auroral oval – a reevaluation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 155-167.

FELDSTEIN, Y. I. et STARKOV, G. V. [1967] Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 15, 209-229.

FORSYTH, P. A. [1972] (In discussion on polar scintillation) *Radar Propagation in the Arctic.*, Ed. J. Frihagen, AGARD-CP-97, IV-2.

FREMOUW, E. J. et FANG, D. J. [1975] An All-Sky-Camera format for radar auroral studies. *Radio Sci.*, Vol. 10, 891-904.

FRIHAGEN, J. et JACOBSEN, T. [1971] *In situ* observations of high latitude F-region irregularities. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 33, 519-522.

GASSMANN, G. J. [1970] An ionospheric model for the arctic. AFCRL-70-0562, Air Force Cambridge, Research Laboratories, Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

GASSMANN, G. J. [1972] Model of Arctic sporadic E. Arctic ionosphere modelling – five related papers, AFCRL-72-0305, 21-28, Air Force Cambridge, Research Laboratories, Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

GUSSENHOVEN, M. S., HARDY, D. A. et BURKE, W. J. [1981] DMSP/F2 electron observations of equatorward auroral boundaries and their relationship to magnetospheric electric fields. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 768-778.

GUSTAFSSON, G. [1970] A revised corrected geomagnetic coordinate system. *Arkiv för Geofysik*, **5**, 595-617.

HAKURA, Y. [1965] Tables and maps of geomagnetic coordinates corrected by the higher order spherical harmonic terms. *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, Vol. 19, 121-157.

HALCROW, B. W. et NISBET, J. S. [1977] A model of F2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 12, 815-820.

HARDY, D. A. et MacKEEN, R. [1980] An algorithm for determining the boundary of auroral precipitation using data from the SSJ/3 sensor. Environmental Research Papers N° 693, AFGL-TR-80-0028, Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique, ADA 084482. (Peut être obtenu auprès de: Defense Technical Information Center, Cameron Station, Alexandria, VA 22314, Etats-Unis d'Amérique.)

HARGREAVES, J. K. [1968] Auroral motions observed with riometers: latitudinal movements and a median global pattern. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 30, 1461-1470.

HARGREAVES, J. K. [1969] Auroral absorption of HF radio waves in the ionosphere: a review of results from the first decade of riometry. *Proc. IEEE*, Vol. 57, 1348-1373.

HARGREAVES, J. K. [1974] Dynamics of auroral absorption in the midnight sector – the movement of absorption peaks in relation to the substorm onset. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 22, 1427-1441.

HARGREAVES, J. K. et COWLEY, F. C. [1967] Studies of auroral radio absorption events at three magnetic latitudes-I occurence and statistical properties of the events. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 15, 1571-1583.

HARTZ, T. R. [1971] Particle precipitation patterns. *The radiating atmosphere*, 225-238, Ed. B. M. McCormac, D. Reidel, Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

HARTZ, T. R. et BRICE, N. M. [1967] The general pattern of auroral particle precipitation. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 15, 301-329.

HARTZ, T. R., MONTBRIAND, L. E. et VOGAN, E. L. [1963] A study of auroral absorption at 30 MHz. *Can. J. Phys.*, **41**, 581-595.

HEPPNER, J. P. [1977] Empirical models of high-latitude electric fields. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 1115-1125.

HERMAN, J. R. et PENNDORF, R. B. [1964] Reception of mid-latitude transmissions in northern Canada. *Arctic Communications*, 97-119, Ed. B. Landmark, AGARDograph 78, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.

HILL, G. E. [1963] Sudden enhancements of F-layer ionization in polar regions. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 20, 492-497.

HILL, G. E. et PENNDORF, R. B. [1959] Research concerning forecasting of anomalous propagation at high latitudes. Tech. Rep., RAD-TR-59-19, AVCO Corp., Wilmington, MA, Etats-Unis d'Amérique.

HOLT, O. et LANDMARK, B. [1964] Some experimental studies of the Arctic D-region. *Arctic Communications* 3-25, Ed. B. Landmark, AGARDograph 78, Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.

HOPKINS, H. D., O'AREY, R. J. et SAYERS, J. [1973] UT control of the topside polar ionosphere. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 21, 1459-1462.

HUNSUCKER, R. D. [1983] Anomalous propagation behavior of radio signals at high latitudes. AGARD Conf. Proc. N° 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 11-1 à 11-15. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. 83-30873 National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

HUNSUCKER, R. D. et BATES, H. F. [1969] Survey of polar and auroral region effects on HF propagation. *Radio Sci.*, Vol. 4, 347-365.

HUNSUCKER, R. D. et GREENWALD, R. A. (Guest Eds.) [1983] Including special papers: radio probing of the high-latitude ionosphere and atmosphere: new techniques and new results, *Radio Sci.*, Vol. 18, **6**.

JELLY, D. H. [1970] On the morphology of auroral absorption during substorms. *Can. J. Phys.*, **48**, 335-345.

JELLY, D. H. et BRICE, N. M. [1967] Changes in Van Allen radiation associated with polar substorms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, 5919-5931.

JOULINA, E. M., KISCHA, D. V., LUKASKIN, V. M. et SCHIRACHKOV, A. V. [1983] *Additional energy losses in high-latitude radio links*, Nauka Publishing House, Moscou, URSS.

KAMIDE, Y., BURCH, J. L., WINNINGHAM, J. D. et AKASOFU, S. I. [1976] Dependence of the latitude of the cleft on the interplanetary magnetic field and substorm activity. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 698-704.

KAMIDE, Y. et WINNINGHAM, J. D. [1977] A statistical study of the «instantaneous» nightside auroral oval: the equatorward boundary of electron precipitation as observed by the Isis-1 and 2 satellites. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 5573-5583.

KASPER, J. F. et HUTCHINSON, C. E. [1978] The Omega navigation system, an overview. *IEEE Comm. Soc. Mag.*, Vol. 16, **3**, 23-35.

KELLEY, M. C., VICKREY, J. F., CARLSON, C. W. et TORBERT, R. [1982] On the origin and spatial extent of high-latitude F region irregularities. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 4469-4475.

KESKINEN, M. J. et OSSAKOW, S. L. [1983] Theories of high latitude ionospheric irregularities: a review. *Radio Sci.*, Vol. 18, 1077-1091.

KIKUCHI, T. et EVANS, D. S. [1983] Quantitative study of substorm-associated VLF phase anomalies and precipitating energetic electrons on November 13, 1979. *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, 871-880.

KIKUCHI, T., NOZAKI, K. et OHTANI, A. [1983] Simultaneous observation of VLF phase and absorption anomalies at Showa station, Antarctica in association with magnetospheric substorms. *Memoirs of Nat. Inst. Polar Res.*, Special Issue, **26**, 113-123. National Institute of Polar Research, Tokyo, Japon.

KONNLEIN, W. et RAITT, W. J. [1978] ESRO-1 and ESRO-4: A model of the UT effect in electron density at middle latitudes of the southern hemisphere. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 26, 1179-1184.

LANGE-HESSE, G. [1968] VHF auroral backscatter communication. *Ionospheric Radio Communications*, 174-206, Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.

LARSEN, T. R. [1974] Irregular variations in the high latitude ionosphere and their effects on propagation. *ELF-VLF Radio Wave Propagation*. 171-185. Ed. J. A. Holtet, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

LAUTER, E. A., BREMER, J., GRAFE, A., DETERS, I. et EVERS, K. [1977] The post-storm ionization enhancements in the mid-latitude D region and related electron precipitation from the magnetosphere. Heinrich-Hertz Institute STP Report N° 9.

LAUTER, E. A., LASTOVICKA, J. et RAPOPORT, Z. T. [1978] Mid-latitude post storm events and interplanetary magnetic field. *Phys. Solariterr.*, **1**, 13-82.

LEADABRAND, R. L., SCHLOBOHM, J. C. et BARON, M. J. [1965] Simultaneous very high frequency and ultra high frequency observations of the aurora at Fraserburgh, Scotland. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 4235-4284.

LIED, F., Ed. [1967] *High frequency radio communications with emphasis on polar problems*, AGARDograph 104, Technivision., Maidenhead, Royaume-Uni.

LISZKA, L. [1972] Polar propagation effects on radio-astronomical and satellite transmissions. *Radar propagation in the Arctic*, AGARD-CP-97, 16-1 à 16-8.

LOMAX, J. B. [1972] Frequency distortion in auroral HF propagation. *Radar propagation in the Arctic*, AGARD-CP-97, 22-1 to 22-12.

MALIK, C. et AARONS, J. [1964] A study of auroral echoes at 19.4 megacycles per second. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, 2557-2564.

MARTIN, E. et AARONS, J. [1977] F layer scintillations and the aurora. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 2717-2722.

McILWAIN, C. E. [1966] Magnetic coordinates. *Space Sci. Rev.*, **5**, 585-598.

MENDILLO, M. et CHACKO, C. C. [1977] The baselevel ionospheric trough. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 5129-5137.

MIKKELSEN, I. S. et DANGAARD, K. [1976] Behavior of auroral zone total electron content during substorms. Proc. COSPAR symposium on the Geophysical Use of Satellite Beacon Observations, 384, Boston, MA, Etats-Unis d'Amérique.

MILLMAN, G. H. [1978] Ionospheric propagation effects on HF backscatter radar measurements. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 211-218. Ed. John M. Goodman. US Govt. Printing Office, 0-277-182, Washington, DC 20402.

MORFITT, D. G. [1977] Effective electron density distributions describing VLF/LF propagation data, Report NOSC TR141, Naval Ocean Systems Centre, San Diego, CA, Etats-Unis d'Amérique.

MULDREW, D. B. et VICKREY, J. F. [1982] High-latitude F region irregularities observed simultaneously with ISIS-1 and the Chataniko radar. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 8263-8272.

NISHIDA, A. [1967] Average structure and storm-time change of the polar topside ionosphere at sunspot minimum. *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, 6051-6061.

PENMAN, J. M., HARGREAVES, J. K. et McILWAIN, C. E. [1979] The relation between 10 to 80 keV electron precipitation observed at geosynchronous orbit and auroral radio absorption observed with riometers. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 27, 445-451.

PIKE, C. P. [1971] A latitudinal survey of the daytime polar F layer. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 7745-7753.

PIKE, C. P. [1972] Equatorward shift of the polar F layer irregularity zone as a function of the Kp index. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 6911-6915.

PIKE, C. P., MENG, C.-I., AKASOFU, S.-I. et WHALEN, J. A. [1974] Observed correlations between interplanetary magnetic field variations and the dynamics of the auroral oval and the high-latitude ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 5129-5142.

POPE, J. H. [1974] High latitude ionospheric irregularity model. *Radio Sci.*, Vol. 9, 675-682.

REILLY, A. E. [1978] The geomagnetic index Q-its persistence, predictability and other pertinent properties, AFGL-TR-78-0223. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

SATO, T. et ROURKE, G. F. [1964] F-region enhancements in the Antarctic. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, 4591-4607.

SCHLOBOHM, J. C., LEADABRAND, R. L., DYCE, R. B., DOLPHIN, L. T. et BERG, M. R. [1959] High-altitude 106.1 – Mc radio echoes from auroral ionization detected at a geomagnetic latitude of 43°. *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, 1191-1196.

SINGLETON, D. G. [1980] Improving the ionospheric irregularity model. *Solar Terrestrial Predictions Proc.*, Vol. IV, Ed. R. F. Donnelly, D1-1 à D1-15, US Govt. Printing Office, Stock N° 003-117-00479-1, Washington, DC 20402.

VALLEY, S. L., Ed. [1965] *Handbook of Geophysics and Space Environment*, McGraw-Hill Book Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WAGNER, R. A. [1972] Modelling the auroral E-layer. Arctic ionospheric modelling – Five related papers, AFCRL 72-0305, 9-20. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

WAGNER, C.-U. et RANTA, H. [1983] The midlatitudinal post-storm electron precipitation belt. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, **12**, 811-822.

WAGNER, C.-U., RANTA, H. et RANTA, A. [1982] Night-time ionospheric absorption during and after magnetospheric storms from auroral (L = 6.0) to medium (L = 2.5) latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 747-757.

WAGNER, R. A., SNYDER, A. L. et AKASOFU, S.-I. [1973] The structure of the polar ionosphere during exceptionally quiet periods. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 21, 1911-1922.

WEBER, E. J. et BUCHAU, J. [1981] Polar cap F layer auroras. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 125.

WESTERLUND, S. et REDER, F. H. [1973a] VLF propagation at auroral latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1453-1474.

WESTERLUND, S. et REDER, F. H. [1973b] VLF signals propagating over the Greenland ice-sheet. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1475-1491.

WHALEN, J. A. [1970] Auroral oval plotter and monograph for determining corrected geomagnetic local time, latitude and longitude for high latitudes in the Northern Hemisphere, Air Force Cambridge Research Laboratories, Report N° AFCRL-70-0422, Environmental Research Paper, N° 327, AD 713170. (Peut être obtenu auprès de: Defense Technical Information Center, Cameron Station, Alexandria, VA 22314, Etats-Unis d'Amérique.)

WHITTEKER, J. H. [1976] The magnetospheric cleft – ionospheric effects. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 1279-1288.

WHITTEKER, J. H. [1977] The transient response of the topside ionosphere to precipitation. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 25, 773-786.

WHITTEKER, J. H., SHEPHERD, G. G., ANGER, C. D., BURROWS, J. R., WALLIS, D. D., KLUMPAR, D. M. et WALKER, J. R. [1978] The winter polar ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 1503-1518.

YEH, K. C. et LIU, C. H. [1982] Radio wave scintillation in the ionosphere. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 324-360.

ZMUDA, A. J. et POTEMRA, T. A. [1972] Bombardment of the polar-cap ionosphere by solar cosmic rays. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, 981-991.

RAPPORT 262-6

PROPAGATION DES ONDES KILOMÉTRIQUES, MYRIAMÉTRIQUES ET PLUS LONGUES DANS ET A TRAVERS L'IONOSPHÈRE

(Question 25/6)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Les fréquences radioélectriques émises dans la gamme de 30 Hz à 300 kHz, qui ont comme particularité d'être réfléchies par les couches les plus basses de l'ionosphère, sont utiles pour toutes sortes d'applications en plus des radiocommunications. En particulier, la stabilité de la propagation des ondes myriamétriques (TBF) (3-30 kHz) est une propriété qui rend ces ondes très utiles pour les systèmes de radionavigation et pour la synchronisation des bases de temps. (Pour les trajets de Terre, on trouve dans le Rapport 895 une étude des caractéristiques de propagation des fréquences inférieures à 30 kHz environ, le Rapport 265 contient des renseignements sur les performances des circuits aux fréquences comprises entre 30 et 500 kHz.) On sait cependant depuis de nombreuses années que les ondes de très basses fréquences peuvent se propager à travers l'ionosphère suivant le «mode sifflement». Des signaux dus aux éclairs furent reçus dans le spectre acoustique et furent appelés «atmosphériques musicaux» [Eckersley, 1925; Barkhausen, 1919]. Au cours de la propagation, ces ondes étaient soumises à la dispersion de telle sorte que leur vitesse décroissait avec la fréquence. Aussi, le signal reçu se présentait-il comme un sifflement de fréquence décroissante en un temps de l'ordre de la seconde ou plus, pouvant être suivi de séries d'échos de dispersion croissantes. Ces caractéristiques furent théoriquement expliquées par la propagation à faible vitesse de l'onde extraordinaire peu atténuée le long d'une trajectoire étroitement confinée autour d'une ligne de force du champ magnétique terrestre. Les échos étaient dus à la réception de signaux se propageant entre points magnétiquement conjugués et se réfléchissant sur le sol [Storey, 1953; Morgan et autres, 1956; Helliwell et Morgan, 1959]. Une bonne revue historique de ces recherches a été publiée [Helliwell, 1965].

La propagation suivant le mode sifflement peut être due à un guidage par des irrégularités d'ionisation alignées le long des lignes de force [Smith, 1961; Cerisier, 1974] ou à un mode non guidé lorsque la normale aux ondes fait un angle notable avec la direction du champ magnétique [Kimura, 1966; Smith et Angerami, 1968; Aikyo et autres, 1972]. Les résultats du tracé de rayons des ondes myriamétriques dans des modèles de magnétosphère [Aikyo et Ondoh, 1971; Walter et Scarabucci, 1974] ont suggéré un piégeage des ondes par le gradient de densité de la plasmapause et un piégeage des ondes non guidées dans la plasmasphère ou à l'extérieur, comme cela a été observé par des satellites [Burtis et Helliwell, 1969; McPherson et Koons, 1970; Gurnett et Shaw, 1973]. La largeur du conduit de propagation des sifflements dans la plasmasphère augmente avec la latitude géomagnétique corrigée [Ondoh, 1976].

2. Utilisation d'émetteurs en ondes myriamétriques et kilométriques

La propagation suivant le mode sifflement a été étudiée en utilisant des émetteurs de grande puissance en ondes myriamétriques (TBF) et kilométriques. Un intérêt croissant s'est manifesté au sujet des problèmes de transmission de fréquences diverses dans ou au-dessus de l'ionosphère et entre des points à la surface de la Terre. Aussi est-il maintenant préférable de parler de propagation d'ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues en général, et de réserver le terme sifflement aux transmissions couvrant tout un spectre de fréquence, comme lorsque l'origine est l'éclair, et pour lequel on peut observer la dispersion des fréquences en fonction du temps.

Il est intéressant de noter que les périodes au cours desquelles des signaux TBF relativement forts ont été reçus entre points conjugués ne sont que faiblement corrélées à celles où l'occurence des sifflements est grande. Aussi, bien que les mesures utilisant les sources naturelles soient d'un grand intérêt pour débrouiller certaines des complexités de la propagation des ondes TBF à travers l'ionosphère, elles doivent être complétées par des expériences directement liées à la propagation d'ondes de fréquences données émises par des émetteurs choisis.

3. Remarques sur les fréquences limites et l'intensité des signaux

Quand les extrémités de la trajectoire sont à la surface de la Terre, on a trouvé que le mode sifflement est effectif pour des fréquences aussi basses que 400 Hz et aussi hautes que 35 kHz. Il existe une très nette fréquence de coupure dont la valeur approximative est de 0,6 fois la gyrofréquence électronique minimale le long du trajet. Des récepteurs, portés par des satellites, ont permis d'étendre les observations aux signaux non guidés et mis le mode sifflement en évidence jusqu'à 0,9 fois la gyrofréquence électronique locale [Dunckel et Helliwell, 1977]. La propogation suivant le mode sifflement a été observée en de nombreux endroits entre les latitudes géomagnétiques de 20° et 80° et même, pendant les nuits d'hiver, à Okinawa et Varanasi où la latitude géomagnétique ne dépasse pas 15° [Ondoh et autres, 1979; Singh et Singh, 1977]. Des observations à moyennes latitudes montrent que, la nuit, des signaux effectuant un seul parcours entre points conjugués selon le mode sifflement peuvent être reçus plus de la moitié du temps et, qu'occasionnellement, leur intensité s'approche à moins de 10 dB de la valeur conventionnelle du signal guidé entre la Terre et l'ionosphère. De jour, l'intensité des signaux se propageant suivant ce mode est mal connue, mais il semble qu'ils soient très atténués par la région D de l'ionosphère.

Des facteurs importants interviennent dans le calcul de l'intensité. Ce sont par exemple:

- la polarisation et la directivité de l'antenne d'émission;
- les caractéristiques de la trajectoire entre les extrémités du guide dans l'ionosphère et les points conjugués au sol;
- le coefficient de transmission relatif à la propagation à travers les plus basses régions de l'ionosphère;
- la divergence spatiale à l'intérieur du guide;
- la multiplicité des trajectoires due à la présence de plusieurs guides;
- l'amplification ou l'absorption de l'énergie du signal par des interactions avec les particules chargées du plasma.

4. Analyse de la propagation

Un programme «full-wave» a été élaboré pour étudier par ordinateur les champs dans une ionosphère statifiée horizontalement, les ondes incidentes arrivant d'en haut ou d'en bas, en fonction d'un vaste échantillonnage de paramètres [Pitteway, 1965; Pitteway et Jesperson, 1966]. Dans quelques uns des modèles étudiés, les effets des couches E sporadique ont été inclus. Pour des ondes arrivant d'en haut, cette ionisation E sporadique peut donner de très grands coefficients de réflexion interne. Ceci n'est important que lorsque l'extrémité la plus éloignée de la ligne de force constituant le guide est éclairée parce qu'alors la propagation aller et retour selon le mode sifflement est possible. Il a été montré qu'une grande partie de l'énergie des sifflements peut être réfléchie en l'absence de E sporadique pourvu que la direction de la normale à l'onde soit à l'extérieur du cône de transmission [Thomas et Smeathers, 1971]. Ceci est important pour interpréter les mesures de sifflements faites à l'aide de fusées.

Aux environs de 14 kHz, le coefficient de transmission relatif aux ondes ascendantes ne varie que lentement quand l'angle d'incidence est compris entre $\pm$ 85° aux moyennes latitudes, tandis qu'à 100 kHz, une transmission efficace n'est possible que si la normale à l'onde est à l'intérieur d'un cône dont l'axe est dirigé suivant le champ magnétique; cette influence du champ magnétique est plus marquée pour toutes les fréquences aux latitudes plus basses [Thomas et Horowitz, 1971]. Tant le jour que la nuit, le coefficient de transmission est principalement déterminé par les pertes dans l'ionosphère pourvu qu'il n'existe pas de gradient exagéré de densité électronique comme on en rencontre dans E sporadique. L'absorption des ondes se propageant suivant le mode sifflement se produit principalement dans les couches inférieures de l'ionosphère et augmente avec la fréquence et avec une diminution de la latitude [Thomas et Horowitz, 1971; Wieder, 1967].

Dans la zone aurorale, l'absorption est considérablement influencée par les précipitations de particules, soit plusieurs dizaines de dB au moment des blackouts polaires, 10 à 20 dB à midi quand le soleil est au-dessus de l'horizon ou la nuit quand il existe une aurore; elle n'est que de quelques dB pendant une nuit d'hiver quand l'ionosphère n'est pas perturbée [Ondoh, 1963; Harang, 1968].

Aux fréquences les plus basses, Galejs [1972] et Pappert [1973] ont trouvé excessifs les moments dipolaires des aériens d'émission portés par un satellite, moments nécessaires pour exciter le guide terrestre de propagation. De Witt et autres [1976] ont calculé les caractéristiques de propagation d'ondes myriamétriques et plus longues à travers l'ionosphère depuis une source située dans la magnétosphère. Les relations établies donnent le rapport de la puissance transmise dans la surface terrestre à celle incidente au sommet de l'ionosphère en fonction du nombre de bonds dans le guide Terre-ionosphère. La polarisation de l'onde a été calculée en fonction de ce nombre de bonds. De plus, pour établir le bilan énergétique du signal émis par une source magnétosphérique d'ondes myriamétriques ou plus longues, il a été nécessaire de tenir compte du facteur de dispersion géométrique de ces ondes qui se propagent depuis la source jusqu'à un récepteur situé à la surface de la Terre [Kelly et autres, 1976a]. Pour tous les émetteurs situés à des altitudes inférieures à 2200 km environ, l'amplitude du facteur de dispersion décroît rapidement à mesure que la distance augmente entre le récepteur et la zone où la puissance reçue sur le sol est maximum. On a montré que ce facteur était plus petit et moins sensible à la position du récepteur si l'émetteur

était immobile à une altitude plus grande. On a calculé en plusieurs cas [Kelly et autres, 1976b] la puissance installée sur le satellite suffisante pour obtenir un rapport signal sur bruit supérieur à 0 dB dans une bande de fréquence large de 1 Hz à une distance au sol de 1000 km mesurée à partir du point d'émergence des ondes hors de l'ionosphère. La puissance nécessaire, de l'ordre du mégawatt, est supérieure à celle qui est disponible à bord des engins spatiaux utilisés pour les missions courantes, mais elle est du domaine réalisable pour les futures centrales électriques spatiales.

5. Observations par satellites

L'étude de la propagation des ondes myriamétriques (TBF) dans et à travers l'ionosphère a considérablement bénéficié de l'usage des satellites. Pour un émetteur situé dans l'ionosphère on doit tenir compte de l'effet d'un milieu fortement anisotrope sur les caractéristiques d'antenne, donc sur l'affaiblissement de transmission. Des observations par satellites de phénomènes TBF dans la magnétosphère ont été publiées [Rycroft, 1967].

Des séries intéressantes d'essais ont eu comme cadre le programme satellite Lofti. Lofti-I a montré que de l'énergie TBF en quantité notable peut pénétrer dans l'ionosphère et que, plus particulièrement, des signaux émis du sol sur 18 kHz y étaient reçus à 16 000 km de distance; l'atténuation, comme attendu, était notablement plus faible la nuit que le jour. Les retards observés allaient de 10 à 200 ms, ce qui montre que la vitesse de propagation des ondes TBF dans l'ionosphère est beaucoup plus faible que dans le vide [Leiphart et autres, 1962]. Avec Lofti-II, les mesures portèrent sur l'intensité des signaux reçus et aussi sur l'impédance d'un dipôle situé dans l'ionosphère; la valeur trouvée, différant totalement de celle relative au vide, est en accord avec la théorie.

Un récepteur, muni d'un dipôle électrique et couvrant la bande 0,4-10 kHz, était placé à bord d'Alouette-1; les signaux reçus étaient intenses. Des sifflements courts fractionnaires, propagés depuis l'éclair en un seul bond à travers l'ionosphère, saturaient souvent le récepteur. Des signaux, qui n'ont pas encore été étudiés, provenaient d'émetteurs situés au sol de grande ou de faible (100 watts) puissance sur 10 kHz. Des sifflements longs fractionnaires, vraisemblablement propagés depuis l'hémisphère opposé le long d'une ligne de force, furent souvent observés avec une dispersion constante pendant un enregistrement d'une dizaine de minutes. On peut penser qu'au cours de cette période, le guidage était particulièrement actif pour conduire les sifflements qui, après être sortis du guide, parcouraient transversalement plusieurs milliers de kilomètres pour atteindre le récepteur. La propagation horizontale des sifflements courts fractionnaires peut amener ces signaux à se réfléchir à l'altitude du satellite [Barrington et Belrose, 1963; Carpenter et autres, 1964; Smith, 1964].

Cependant, la réception simultanée de sifflements au sol et en satellite [Thomson et Dowden, 1977a] montre que la plupart des sifflements ne parviennent aux satellites qu'après réflexion au niveau de la base de l'ionosphère. Comme les sifflements se propageant vers le bas sortent généralement des guides à des altitudes bien supérieures à 1000 km [Thomson et Dowden, 1977b], les sifflements provenant d'un guide donné peuvent être reçus par les satellites sur une grande distance le long de la trajectoire de ces derniers (jusqu'à 2000 km pour ISIS-2 à une altitude de 1400 km). Des domaines de réception encore plus grands, sans que changent les caractéristiques de dispersion, se rencontrent pour des sifflements non guidés «pro-longitudinaux» [Thomson et Dowden, 1977c]. La propagation transverse n'entre pas en ligne de compte dans ces deux cas qui sont dus à une déviation, de l'ordre de 20°, par rapport à une propagation strictement guidée par le champ magnétique.

Alors que, théoriquement, on s'attendrait à ce que la propagation des ondes de fréquence extrêmement basse soit fortement influencée par la présence d'ions, leurs effets n'ont pas été directement observés avant que ne débutent ces mesures en satellites. L'importance des ions est illustrée par la découverte des sifflements ioniques [Smith et autres, 1964; Barrington et autres, 1966a et b] qui ont été utilisés pour mesurer la masse ionique moyenne des composants du milieu à l'altitude du satellite [Gurnett et autres, 1965; Barrington et McEwen, 1967]. De plus, une résonance TBF de plasma, la résonance hybride basse propre à la propagation transverse, a été identifiée parmi les données d'Alouette comme une fréquence de coupure du bruit TBF [Brice et autres, 1964]. C'est là une autre source d'information sur la masse ionique moyenne à l'altitude du satellite [Barrington et autres, 1965].

6. Conclusions

L'étude de la propagation des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues dans et à travers l'ionosphère a débuté avec les observations au sol des sifflements dont les caractéristiques sont principalement dues à leur long parcours dans la magnétosphère. Les observations faites en satellite ont fait progresser très sérieusement nos connaissances sur la propagation à l'intérieur de l'ionosphère; elles ont révélé l'importance, aux fréquences les plus basses, de la propagation transverse à la direction du champ magnétique terrestre et du rôle des ions. Comme il fallait s'y attendre, l'ionosphère influence fortement la propagation des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues qui peuvent la pénétrer par le mode sifflement. Ce mode de propagation, qui peut être utilisé de la Terre vers l'espace et vice-versa, est caractérisé par des retards de groupe importants, des atténuations éminemment variables, des trajectoires de parcours indirectes et aussi par une interaction compliquée entre les ondes propagées et les particules énergétiques présentes dans l'ionosphère. En liaison avec cette dernière remarque, il a été proposé d'installer dans les satellites des émetteurs d'ondes myriamétriques et kilométriques très puissants. Il y a là un risque de créer du bruit radioélectrique et des brouillages importants qui ont cependant des chances d'être limités par la difficulté même de fournir de grandes puissances à des émetteurs embarqués.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIKYO, K. et ONDOH, T. [1971] Propagation of non-ducted VLF waves in the vicinity of the plasmapause, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **18**, 153-182.

AIKYO, K., ONDOH, T. et NAGAYAMA, M. [1972] Non-ducted whistlers observed in the plasmasphere, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **19**, 151-174.

BARKHAUSEN, H. [1919] Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen (Deux phénomènes découverts grâce à l'emploi de nouveaux amplificateurs), *Phys. Z.*, **20**, 401-403.

BARRINGTON, R. E. et BELROSE, J. S. [1963] Preliminary results from the very low frequency receiver aboard Canada's Alouette satellite. *Nature*, Vol. 198, **4887**, 651-656.

BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et NELMS, G. L. [1965] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from simultaneous observations of a VHF plasma resonance and topside sounding data from the Alouette I satellite. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1647-1664.

BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et MATHER, W. E. [1966a] A helium whistler observed in Canadian satellite Alouette II. *Nature*, Vol. 210, 80-81.

BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et NELMS, G. L. [1966b] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from VLF plasma resonances and opside ionograms. *Electron density distributions in the ionosphere and exosphere*, edited by J. Frihagen, North-Holland. Publ. Co., Amsterdam, Pays-Bas.

BARRINGTON, R. E. et McEWEN, D. J. [1967] Ion composition from VLF phenomena observed by Alouette I and II. *Space Res.* **VII**, 624-633.

BRICE, N. M., SMITH, R. L., BELROSE, J. S. et BARRINGTON, R. E. [1964] Recordings from satellite Alouette I – a very low frequency plasma resonance. *Nature*, Vol. 203, **4948**, 926-927.

BURTIS, W. J. et HELLIWELL, R. A. [1969] Banded chorus – A new type of VLF radiation observed in the magnetosphere by OGO 1 and OGO 3, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 3002-3010.

CARPENTER, D. L., DUNCKEL, N. et WALKUP, J. F. [1964] A new very low frequency phenomenon – whistlers trapped below the protonosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5009-5017.

CERISIER, J. C. [1974] Ducted and partly ducted propagation of VLF waves through the magnetosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1443-1467.

DE WITT, R. N., KELLY, F. J. et CHAYT, G. A. [1976] Lower ionospheric effects on the propagation of waves from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 189-197.

DUNCKEL, N. et HELLIWELL, R. A. [1977] Spacecraft observations of man-made whistler-mode signals near the electron gyrofrequency. *Radio Sci*, Vol. 12, **5**, 821-829.

ECKERSLEY, T. L. [1925] A note on musical atmospheric disturbances. *Phil Mag.*, **49**, 1250-1260.

GALEJS, J. [1972] Stable solutions of ionospheric fields in the propagation of ELF and VLF waves. *Radio Sci.*, **7**, 549-561.

GURNETT, D. A. et SHAW, R. R. [1973] Electromagnetic radiation trapped in the magnetosphere above the plasma frequency, *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, **34**, 8136-8149.

GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., SMITH, R. L. et BRICE, N. M. [1965] Ion cyclotron whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 1665-1688.

HARANG, L. [1968] VLF emissions observed at stations close to the auroral zone and at stations on lower latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1143-1160.

HELLIWELL, R. A. [1965] *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford University Press, Stanford, CA, Etats-Unis d'Amérique.

HELLIWELL, R. A. et MORGAN, M. G. [1959] Atmospheric whistlers, *Proc. IRE*, **47**, 200-208.

KELLY, F. J., BAKER, D. J. et CHAYT, G. A. [1976a] Spreading of waves emitted from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 93-106.

KELLY, F. J., CHAYT, G. A. et BAKER, D. J. [1976b] Waveguide-mode power budget for an ELF/VLF transmitting satellite. Naval Research Laboratory Report No. 8032 (Accession N° AD A002287), National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

KIMURA, I. [1966] Effect of ions on whistler-mode ray tracing, *Radio Sci.*, **1**, 269-283.

LEIPHART, J. P., ZEEK, R. W., BEARCE, L. S. et TOTH, E. [1962] Penetration of the ionosphere by very low frequency radio signals. Interim results of the LOFTI I experiment. *Proc. IRE*, **50**, 6-17.

McPHERSON, D. A. et KOONS, H. C. [1970] Dependence of ELF emissions on the location of the plasmapause, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5559-5564.

MORGAN, M. G., DINGER, H. E. et ALLCOCK, G. McK. [1956] Observations of whistling atmospherics at geo-magnetically conjugate points. *Nature*, Vol. 177, 29-31.

ONDOH, T. [1963] The ionospheric absorption of the VLF emissions at the auroral zone, *J. Geomag. Geoelect.*, **15**, 90-108.

ONDOH, T. [1976] Magnetospheric whistler ducts observed by ISIS satellites. *J. Radio Res. Labs.*, (Japon), **23**, 139-147.

ONDOH, T., KOTAKI, M., MURAKAMI, T., WATANABE, S. et NAKAMURA, Y. [1979] Propagation characteristics of low-latitude whistlers. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2097-2104.

PAPPERT, R. A. [1973] Excitation of the earth-ionosphere waveguide by point dipoles at satellite heights. *Radio Sci.*, **8**, 535-545.

PITTEWAY, M. L. V. [1965] The numerical calculation of wawe fields, reflection coefficients and polarizations for long waves in the lower ionosphere. Part I, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Series A, **257**, 219-242.

PITTEWAY, M. L. V. et JESPERSON, J. L. [1966] A numerical study of the excitation, internal reflection and limiting polarization of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 17-43.

RYCROFT, M. J. [1967] A review of satellite observations of VLF phenomena in the magnetosphere, in MF, LF and VLF propagation. IEE Conf. Publ., **36**, 267-294.

SINGH, R. N. et SINGH, R. P. [1977] Whistlers recorded at Varanasi. *Nature*, Vol. 266, 40-41.

SMITH, R. L. [1961] Propagation characteristics of whistlers trapped in field-aligned columns of enhanced ionization, *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3699-3716.

SMITH, R. L. [1964] An explanation of sub-protonospheric whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5019-5021.

SMITH, R. L. et ANGERAMI, J. J. [1968] Magnetospheric properties deduced from OGO 1 observations of ducted and non-ducted whistlers, *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 1-20.

SMITH, R. L., BRICE, N. M., KATSUFRAKIS, J., GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., BELROSE, J. S. et BARRINGTON, R. E. [1964] An ion gyrofrequency phenomenon observed in satellites. *Nature*, Vol. 204, 274-275.

STOREY, L. R. O. [1953] An investigation of whistling atmospherics. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Series A, **246**, 113-141.

THOMAS, L. et HOROWITZ, S. [1971] The ionospheric absorption of downgoing whistler waves during night-time. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 879-888.

THOMAS, L. et SMEATHERS, J. R. [1971] The internal reflection of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 959-962.

THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977a] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 1. Ducted whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 869-878.

THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977b] Ionospheric propagation of whistlers. *Planet. and Space Sci.*, **25**, 1037-1043.

THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977c] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 2. PL whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 879-890.

WALTER, F. et SCARABUCCI, R. R. [1974] VLF ray trajectories in a latitude-dependent model of the magnetosphere, *Radio Sci.*, **9**, 7-15.

WIEDER, B. [1967] Transmission of VLF radio waves through the ionosphere. *Radio Sci.*, **2**, 595-605.

RECOMMANDATION 371-5

CHOIX D'INDICES POUR LES PRÉVISIONS IONOSPHÉRIQUES A LONG TERME

(Programme d'études 26A/6)

(1963-1970-1974-1978-1982-1986)

Le CCIR

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires R_{12} soit adoptée comme indice à utiliser pour toutes les prévisions ionosphériques faites plus de 12 mois à l'avance, à partir de la date de la dernière valeur connue de R_{12};

2. que la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires R_{12}, ou de l'indice IG, IG_{12}, ou bien l'indice Φ (définis dans l'Annexe I) soient adoptés comme indice à utiliser pour la prévision des valeurs médianes mensuelles de foF2 et de M(3000)F2 jusqu'à 6 mois à l'avance et, parfois, jusqu'à 12 mois à l'avance à partir de la date des dernières valeurs observées. Il devrait être possible d'obtenir des résultats sensiblement équivalents en utilisant l'un quelconque de ces indices;

3. que Φ soit adopté comme indice à utiliser pour les prévisions des valeurs médianes mensuelles de foE et foF1 jusqu'à 6 mois à l'avance et, parfois, jusqu'à 12 mois à l'avance à partir de la dernière valeur observée;

4. que les indices recommandés soient cependant utilisés avec circonspection pour les latitudes magnétiques élevées où les prévisions ionosphériques peuvent ne pas être suffisamment exactes.

ANNEXE I

1. Introduction

La notion d'indices pour les prévisions ionosphériques à long terme repose sur l'hypothèse suivante: les caractéristiques les plus importantes de l'ionosphère, telles que les fréquences critiques des différentes couches et le facteur de MUF, M(3000)F2, varient d'une façon systématique en fonction de certaines grandeurs mesurables liées au rayonnement solaire. Il convient de noter, cependant, que la corrélation entre ces indices et les caractéristiques ionosphériques réelles n'implique pas nécessairement une relation de cause à effet, mais plutôt une indication se rapportant à des phénomènes associés. Les variations de l'activité solaire contiennent en général trois composantes:

- une composante assez régulière dont la période est d'environ 11 ans, qui correspond au cycle bien connu d'activité solaire;
- une composante ayant une quasi-période d'environ un an, ou un peu moins, et
- des fluctuations erratiques dont les périodes sont inférieures à un mois.

2. Nombres de taches solaires

Pour étudier la principale composante du cycle solaire, on se sert de la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires, R_{12}; l'adoucissement résultant de l'emploi de cette moyenne réduit en effet sensiblement les composantes dont la variation est compliquée et rapide, sans pour cela masquer la composante à variation lente.

La définiton de R_{12} est la suivante:

$$R_{12} = \frac{1}{12}\left[\sum_{n-5}^{n+5} R_k + \frac{1}{2}\left(R_{n+6} + R_{n-6}\right)\right] \qquad (1)$$

dans laquelle R_k est la valeur moyenne des nombres journaliers de taches solaires pour le mois k et R_{12} l'indice adouci pour le mois représenté par $k = n$.

L'utilisation de R_{12}, comme indice, présente les deux principaux inconvénients suivants:

- la valeur la plus récente de R_{12} dont on puisse disposer se rapporte forcément à une période dont le mois central est au moins antérieur de 6 mois au moment actuel;
- R_{12} ne peut être utilisé pour prévoir les variations à plus court terme de l'activité solaire.

R_{12} semble néanmoins le paramètre le plus utile pour les études et les prévisions à long terme concernant la couche F2.

3. Indice Φ

Des laboratoires canadiens, japonais, etc., ont fait des séries d'observations cohérentes et assez longues du flux de bruit radioélectrique solaire sur des longueurs d'onde d'environ 10 cm. La moyenne mensuelle, Φ, des valeurs journalières relevées à Ottawa et exprimées en unités 10^{-22} Wm^{-2} Hz^{-1}, devrait être considérée comme la donnée de référence pour cet indice. La corrélation entre la fréquence critique de la couche E et les valeurs de Φ est meilleure qu'avec les valeurs du flux du bruit sur d'autres longueurs d'onde [Kundu, 1960]. Etant donné que l'on ne dispose d'observations du flux solaire que depuis 1947, les nombres des taches solaires continuent à constituer une des plus longues séries d'observations d'un phénomène naturel. Il convient donc de poursuivre le rassemblement et l'enregistrement de données d'observations sur les taches solaires.

4. Indice d'activité solaire déduit d'observations ionosphériques, IG

Un indice d'activité solaire déduit d'observations ionosphériques IG, destiné à la prévision de foF2, a été spécialement défini [Liu et autres, 1983] pour être utilisé avec la version d'Oslo des cartes du CCIR (voir également le Vœu 82).

5. Autres indices

Un indice I_{F2} a été mis au point, fondé sur des mesures de foF2 faites à midi dans des observatoires ionosphériques établis depuis longtemps. Minnis [1964] a montré que cet indice est en meilleure corrélation avec foF2 que tout autre indice disponible à l'époque. Un autre indice, T, a été mis au point en Australie [IPSD, 1968] d'après des résultats de mesure obtenus dans 30 stations; il est basé sur la moyenne des valeurs médianes mensuelles de foF2 pour chaque heure. On obtient cet indice de la même façon que I_{F2}, avec cette différence qu'on se sert des données correspondant à toutes les heures.

6. Corrélation entre les divers indices

Les figures et équations données ci-après représentent les relations qui existent entre les valeurs observées de Φ, R_{12}, et I_{F2}.

La Fig. 1 représente la relation moyenne entre R_{12} et Φ, déterminée d'après les données relatives aux années 1947-1966 [Joachim, 1966a, 1966b]. Cette relation correspond à l'expression:

$$\Phi = R_{12} + 46 + 23e^{-0,05\,R12} \tag{2}$$

Stewart et Leftin [1972] ont étudié la relation existant entre R_{12} et Φ_{12} (Φ_{12} est la moyenne glissante de Φ sur 12 mois). Ils proposent l'équation suivante, également représentée à la Fig. 1:

$$\Phi_{12} = 63,7 + 0,728\ R_{12} + 8,9 \times 10^{-4}\ R_{12}^2 \tag{3}$$

Plusieurs auteurs ont étudié la relation existant entre R_{12} et I_{F2}. En utilisant les données recueillies pour les années 1938 à 1960, Barclay [1962] a conclu que les valeurs peuvent être représentées par:

$$R_{12} = 11,44 + 0,478\ I_{F2} + 0,00278\ I_{F2}^2 \tag{4}$$

Cette expression est représentée graphiquement à la Fig. 2.

Joachim [1966a] a étudié la relation qui existe entre R_{12} et I_{F2}, séparément pour l'activité solaire croissante et pour l'activité solaire décroissante. La formule complète de cet auteur, pour la relation moyenne, est la suivante (voir la Fig. 2):

$$I_{F2} = (2,05 + 0,001\ R_{12})\ R_{12}^{(0,946\ -\ 0,00047\ R12)} - 20 \tag{5}$$

Muggleton et Kouris [1968] ont établi des formules distinctes pour la relation entre R_{12} et I_{F2}, pour chaque moitié du cycle solaire entre 1938 et 1958.

Le Tableau I donne pour les différents mois de l'année, la relation entre l'indice T et R_{12} [IPSD, 1968].

Il convient de noter que l'on aura des expressions légèrement différentes des relations susmentionnées pour les différents cycles solaires.

7. La prévision des indices

Aucune méthode ne permet encore de prévoir avec certitude et précision les indices pour le prochain cycle d'activité solaire et, plus généralement, pour un cycle qui n'a pas encore commencé. Les indices que l'on a calculés par analyse harmonique ou au moyen de lois empiriques ou statistiques appliquées à des observations faites au cours de cycles précédents – même récents – se sont révélés inutiles pour prévoir ceux d'un nouveau cycle. Ce n'est qu'après avoir reconnu un minimum que l'on peut dans une certaine mesure prévoir la future évolution du cycle solaire, par extrapolation. Encore faut-il signaler qu'on a observé dans ce cas des écarts extrêmement importants.

Une étude entreprise en 1956 par le Secrétariat du CCIR sur différentes catégories de méthodes de prévision concluait qu'il était impossible d'obtenir des prévisions de l'indice solaire R_{12} entachées d'une erreur inférieure à 10. Seules les méthodes statistiques (comparaison des cycles ou autocorrélation) sont considérées comme utiles; celles qui reposent sur l'analyse harmonique n'ont jamais produit de résultats satisfaisants.

Aux Etats-Unis, les prévisions de R_{12} se font d'après une méthode imaginée par Stewart et Ostrow [1970] qui est un perfectionnement de la méthode objective plus ancienne de McNish et Lincoln. La valeur moyenne du cycle est évaluée, en premier lieu, d'après toutes les valeurs de R_{12} pour les cycles antérieurs, ordonnées à partir du minimum de chacun de ces cycles sur une durée de onze ans. Pour la prévision d'une valeur particulière du cycle en cours, la première approximation est la valeur correspondante du cycle moyen, au moment spécifié après le minimum (Fig. 3). On améliore cette estimation en lui appliquant une correction proportionnelle à l'écart entre la dernière valeur observée du cycle en cours et la valeur du cycle moyen. Les programmes d'ordinateur actuels permettent de faire une nouvelle prévision pour chaque mois du reste du cycle dès que l'on dispose d'une nouvelle valeur observée. L'incertitude statistique de la prévision est assez faible pour les quelques premiers mois qui suivent la dernière valeur observée, mais elle devient importante pour les prévisions faites 12 mois à l'avance ou davantage. Aussitôt qu'un minimum a été identifié, on peut calculer de nouveaux facteurs de correction en tenant compte, pour les appliquer au nouveau cycle, des valeurs observées lors du cycle précédent.

En URSS, la prévision du nombre relatif de taches solaires est basée sur une des différentes méthodes de prévision données par Vitinski [1973].

Des prévisions de IG_{12} sont aussi établies régulièrement au Royaume-Uni, au moyen d'une version modifiée de la méthode de McNish-Lincoln. Des renseignements détaillés sont donnés par Smith [1986], qui a montré que les prévisions de IG_{12} ainsi obtenues sont plus précises que celles de R_{12}, surtout pour des périodes de prévision se situant plus d'un an à l'avance.

TABLEAU I – *Relation entre T, l'indice ionosphérique utilisé par l'Administration australienne, et* R_{12}

$$T = c + d \cdot R_{12}$$

Mois	Ordonnée à l'origine *(c)*	Pente *(d)*
Janvier	−1,58	0,96
Février	0,81	0,94
Mars	−0,65	0,97
Avril	−0,54	0,99
Mai	−0,06	1,00
Juin	0,34	1,01
Juillet	−0,18	1,00
Août	1,19	0,97
Septembre	2,70	0,93
Octobre	1,87	0,93
Novembre	2,45	0,92
Décembre	−0,04	0,96

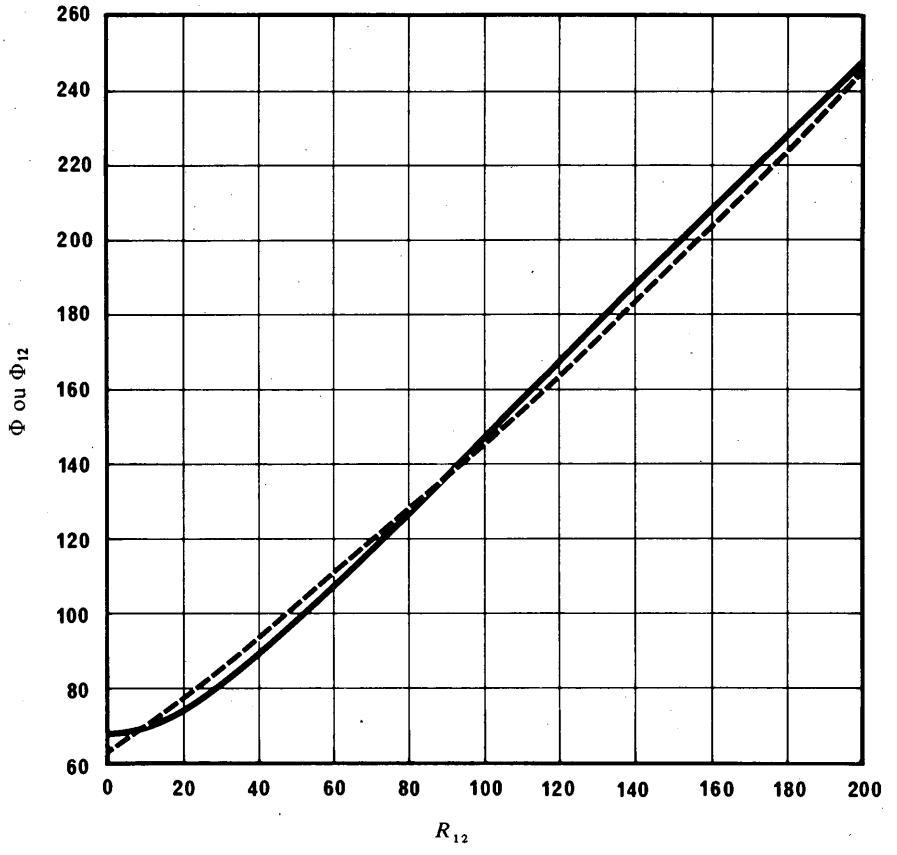


FIGURE 1 – *Relation entre* R_{12} *et* Φ *ou* Φ_{12}

——— relation avec Φ (d'après l'équation (2))

– – – – – relation avec Φ_{12} (d'après l'équation (3))

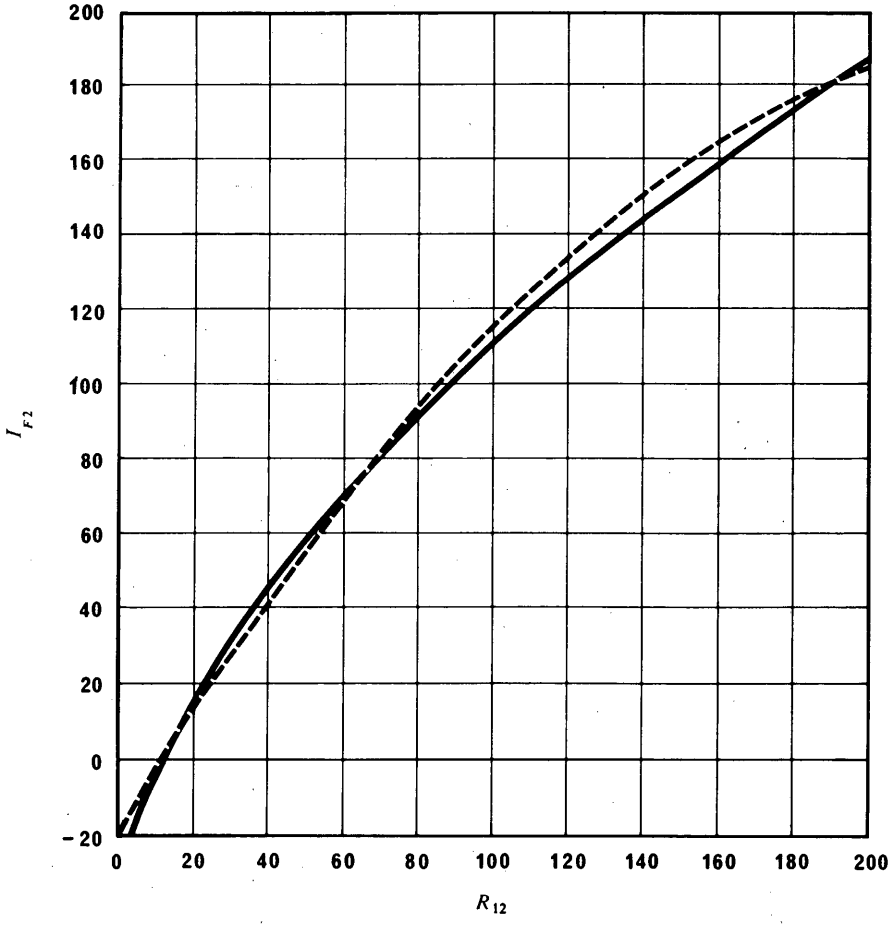


FIGURE 2 – *Relation entre R_{12} et I_{F2}*

——— d'après l'équation (4)

– – – – – – d'après l'équation (5)

On effectue régulièrement, au Royaume-Uni, des prévisions de l'indice I_{F2}, six mois à l'avance, en extrapolant la moyenne glissante sur 12 mois. La méthode employée pour déterminer la tendance future consiste à ajuster les valeurs relatives au cycle d'activité solaire en cours avec celles des cycles antérieurs; l'extension se fait par référence à la grandeur et à la vitesse de la variation pour la même phase, dans les cycles antérieurs [Smith, 1968]. On normalise les évaluations subjectives faites par cette méthode, de manière que les résultats soient cohérents avec les valeurs fournies par d'autres méthodes pour des périodes voisines du maximum et du minimum d'activité solaire, c'est-à-dire lorsque le cycle change de sens. On utilise des relations statistiques appropriées (par exemple, la variation de R_{12} à des moments différents, après le maximum et le minimum d'activité solaire, en fonction de la valeur maximale de R_{12} pour le cycle), pour obtenir les renseignements nécessaires sur l'évolution du cycle; les nombres de taches solaires ainsi obtenus sont convertis en valeur de I_{F2}, par application des formules données au § 6.

Les prévisions de Φ se font au moyen d'une méthode informatique mise au point par le Secrétariat du CCIR [Joachim et autres, 1972]. Cette méthode a été modifiée pour pouvoir être appliquée lors du passage d'un cycle d'activité solaire à un autre.

Les valeurs mesurées et prévues de R_{12}, IG_{12}, I_{F2}, et de Φ sont publiées dans les circulaires mensuelles du CCIR et dans le Journal des télécommunications.

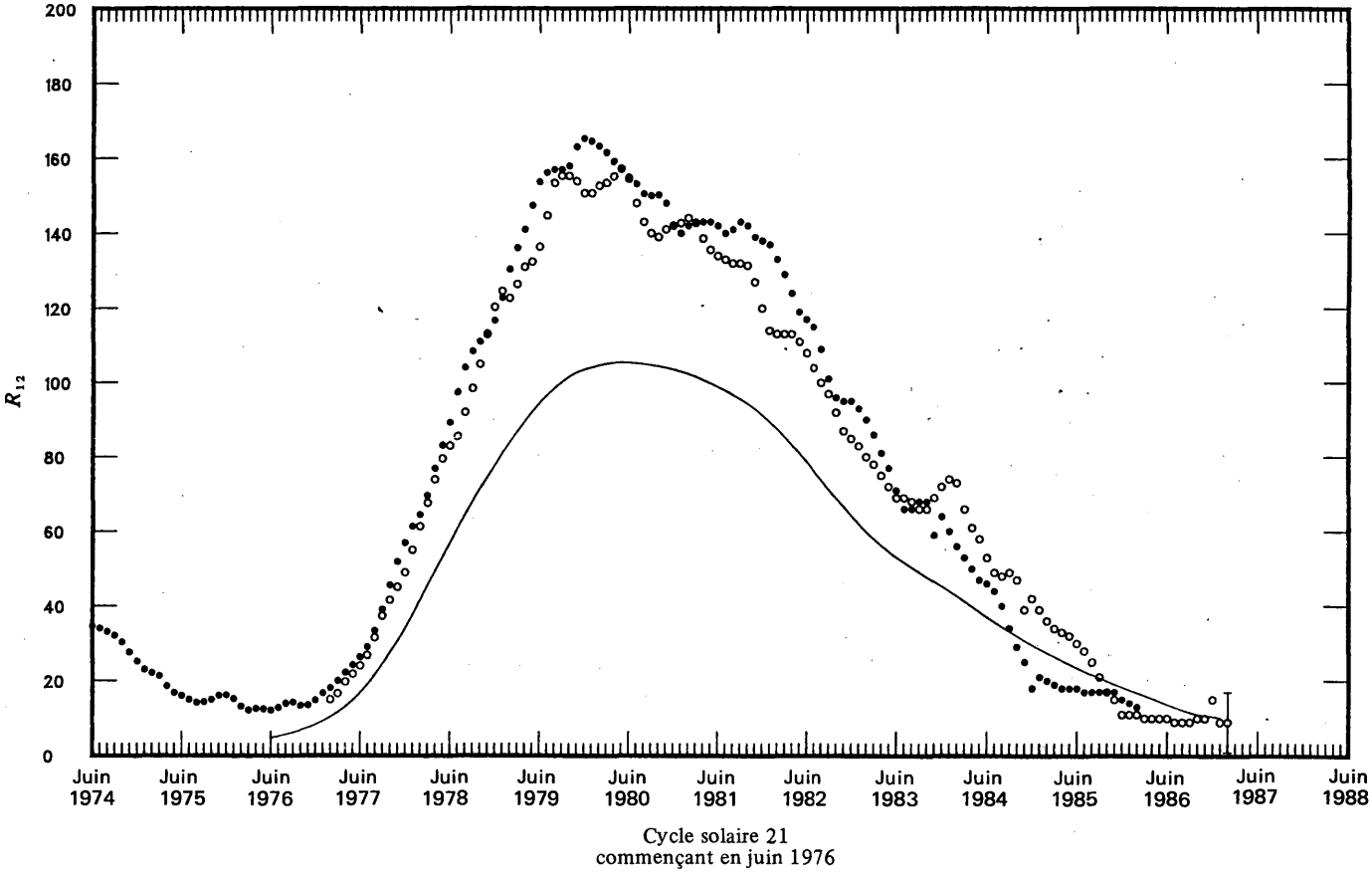


FIGURE 3 – *Nombre de taches solaires prévues et observées, R_{12}*

——— moyenne des cycles 8-20

..... cycle 21 observé

o o o o o o cycle prévu 21

8. Comparaison des indices

Des études relatives aux erreurs de prévision de foF2 résultant de l'utilisation de IG_{12} et de R_{12} ont été mentionnées dans des documents du CCIR [CCIR, 1982-86a, b, c, d]. Ces comparaisons reposent sur des données recueillies par de nombreuses stations situées à diverses latitudes et longitudes, et pour diverses périodes de comparaison. Des études analogues [Wilkinson, 1982; CCIR, 1985] s'appuyaient sur au moins dix ans d'observations en treize stations à incidence verticale. Des comparaisons ont été faites au moyen des indices IG, R_{12}, I_{F2}, T et autres.

Il ressort nettement de ces études qu'il n'est guère plus avantageux d'utiliser un indice plutôt qu'un autre. Néanmoins, la balance pencherait plutôt en faveur d'indices déduits d'observations ionosphériques, par exemple IG_{12}. Bien que la différence de précision résultant de l'utilisation de cet indice soit faible, elle va dans le sens de ce qu'on peut attendre de l'utilisation d'un indice purement ionosphérique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARCLAY, L. W. [1962] Variations in the relation between sunspot number and I_{F2}. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **24**, 547-549.

IPSD [1968] The development of the ionospheric index *T*. Report IPS-R11. Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

JOACHIM, M. [1966a] Study of correlation of the three basic indices of ionospheric propagation: R_{12}, I_{F2} and Φ. *Nature*, Vol. 210, 289-290.

JOACHIM, M. [1966b] Un effet d'hystérésis ionosphérique. *C. R. Acad. Sci.* (Paris), B, **263**, 92-94.

JOACHIM, M., GROMOV, A. et GUILLOT, P. [1972] Prévisions des indices Φ et Φ_{F2} de la propagation ionosphérique. *C. R. Acad. Sci.* (Paris), B, **275**, 473-476.

KUNDU, M. R. J. [1960] Solar radio emission on centimeter waves and ionization of the E layer of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3903-3907.

LIU, R. Y., SMITH, P. A. et KING, J. W. [1983] Un nouvel indice solaire dont l'utilisation améliore les prévisions de foF2 fondées sur l'Atlas du CCIR. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, **VIII**, 408-414.

MINNIS, C. M. [1964] Ionospheric indices *Advances in Radio Research*, Vol. II, Ed. J. A. Saxton. Academic. Press, Londres et New York.

MUGGLETON, L. M. et KOURIS, S. S. [1968] Relation between sunspot number and the ionospheric index I_{F2}. *Radio Sci*, **3**, 1109-1110.

SMITH, P. A. [1968] An ionospheric prediction system based on the index I_{F2}. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 177-185.

SMITH, P. A. [1986] Some techniques used to predict solar activity through the 11-year cycle. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, p. 8, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, Mass. 01731, Etats-Unis d'Amérique.

STEWART, F. G. et LEFTIN, M. [1972] Relation entre le flux du bruit radioélectrique solaire mesuré à Ottawa sur 10,7 cm et les nombres de taches solaires de Zurich. *J. des Télécomm.*, **39**, 159-169.

STEWART, F. G. et OSTROW, S. M. [1970] Perfectionnement de la méthode de McNish-Lincoln pour la prévision de l'activité solaire. *J. des Télécomm.*, **37**, 228-232.

VITINSKI, J. I. [1973] *Cycles et Prévisions de l'Activité Solaire* (en russe) Akademi ia Nauk, Leningrad, URSS.

WILKINSON, P. J. [1982] A comparison of monthly indices of the ionospheric F region. IPS Tech. Rep. R-41. Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

Documents du CCIR

[1982-86]: **a.** 6/181 (France); **b.** 6/188 (République démocratique allemande); **c.** 6/204 (Japon); **d.** 6/207 (Chine (République populaire de)).

[1985]: GTI 6/1, Doc. 256 (Etats-Unis d'Amérique).

RECOMMANDATION 373-5 *

DÉFINITION DES FRÉQUENCES MAXIMALES DE TRANSMISSION

(Question 25/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que les services de prévisions, les scientifiques et les exploitants de services de radiocommunication ont besoin de définir de façon différente la fréquence maximale de transmission,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ d'utiliser les définitions suivantes:

1. la *MUF d'exploitation*, ou simplement *MUF*, est la fréquence la plus élevée qui permet, à un moment donné, d'assurer un service de radiocommunication de qualité acceptable entre des stations terminales données, dans des conditions d'exploitation spécifiées (types d'antennes, puissance d'émission, classe d'émission, débit d'information et rapport signal/bruit nécessaire);

2. la *MUF de référence* est la fréquence la plus élevée à laquelle une onde radioélectrique peut se propager entre des stations terminales données, en une occasion spécifiée, par réfraction ionosphérique exclusivement.

---

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de l'Union radioscientifique internationale (URSI), ainsi que des Commissions d'études 3, 7, 8 et 10 et de la CMV.

ANNEXE I

1. *La fréquence optimale de travail (FOT)*, (en anglais: optimum working frequency (OWF ou FOT)), est le décile inférieur des valeurs journalières de la MUF d'exploitation, à un moment donné, pour une période spécifiée, habituellement un mois. En d'autres termes, la FOT est la fréquence qui est dépassée par la MUF d'exploitation pendant 90% de la période spécifiée.

2. Lorsque la MUF de référence est limitée à un mode de propagation ionosphérique particulier, ses valeurs peuvent être accompagnées de l'indication de ce mode (par exemple 1E MUF ou 2F2 MUF).

Si la composante extraordinaire de l'onde est mise en cause, on doit l'indiquer (par exemple, 1F2 MUF (X)). L'absence de référence spécifique à la composante magnéto-ionique signifie que la valeur indiquée se rapporte à l'onde ordinaire.

Il est parfois utile d'indiquer la portée au sol pour laquelle la MUF de référence doit être utilisée. Cette indication, en kilomètres, figure à la suite de l'indication du mode (par exemple, 1F2 (4000) MUF (X)).

3. Le nouveau terme *MUF de référence* englobe les termes *MUF normalisée* et *MUF classique* qui étaient définis dans la Recommandation 373 (Kyoto, 1978) et utilisés avant 1982.

RECOMMANDATION 434-4

ATLAS CCIR DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPHÉRIQUES

(Question 25/6)

(1966-1970-1974-1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'édition actuelle de l'Atlas comprend le Rapport 340-5, publié séparément, ainsi que les bandes magnétiques et les programmes d'ordinateur associés;

b) que l'Atlas contient des données de base et des formules utiles pour évaluer les caractéristiques de la propagation des ondes radioélectriques et celles de l'état de l'ionosphère;

c) que ces données ne répondent pas aux mêmes besoins, selon les applications considérées,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que, pour évaluer la MUF de référence à l'aide d'un ordinateur de capacité suffisante, on utilise les données contenues dans la Partie 11 du Rapport 340-5;

2. que, pour évaluer la MUF de référence par des moyens manuels, on utilise les données contenues dans la Partie 9 du Rapport 340-5;

3. que, pour évaluer foEs et fbEs, on utilise les données contenues dans la Partie 5 du Rapport 340-5;

4. que, pour évaluer h'F et h'F,F2, on utilise les données contenues dans la Partie 7 du Rapport 340-5;

5. que, pour évaluer le pourcentage d'occurrence de F-diffus, on utilise les données contenues dans la Partie 6 du Rapport 340-5;

6. que, pour déterminer un modèle de distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F, on utilise les données contenues dans la Partie 8 du Rapport 340-5.

Note 1. – Les administrations et les organisations, ainsi que l'IFRB, qui disposent d'un ordinateur utilisent de préférence les versions pour ordinateur de l'Atlas; dans les autres cas, les méthodes manuelles de l'Atlas doivent être utilisées.

Note 2. – Le Directeur du CCIR est prié de conserver les programmes d'ordinateur et les bandes magnétiques et de les tenir à la disposition des intéressés, selon les indications données dans la Résolution 63.

RAPPORT 340-5

ATLAS CCIR DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPHÉRIQUES

(Recommandation 434)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

En accord avec les décisions de la XVI[e] Assemblée Plénière, ce Rapport remplace le Rapport 340 (Oslo, 1966) ainsi que ses Suppléments. Il est publié séparément sous forme de fascicule.

RAPPORT 255-6

PRÉVISIONS A LONG TERME DE LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 26B/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Prévision de la MUF de référence

Lorsqu'on fait des prévisions des conditions médianes mensuelles de la propagation ionosphérique, il importe de considérer séparément, d'une part, la conversion des données de propagation ionosphérique sous incidence verticale en caractéristiques de propagation sous incidence oblique et, d'autre part, la prévision des données de propagation sous incidence verticale, qui dépend de la précision et de l'existence d'observations ionosphériques, et aussi de la prévision d'autres phénomènes géophysiques.

La prévision des données ionosphériques exige:

- une représentation précise et fiable (graphique ou mathématique)
- la connaissance de la corrélation avec l'activité solaire.

Quelle que soit la méthode utilisée pour représenter les données ionosphériques, il est nécessaire de les extrapoler pour les régions du monde dans lesquelles les observations ionosphériques sont rares ou inexistantes. D'autre part, les indices d'activité solaire sont des estimations grossières qui font appel à une méthode de prévision différente. Il existe donc, de toute évidence, plusieurs sources possibles d'erreurs inhérentes au processus de prévision des fréquences utilisées pour les radiocommunications.

Parmi ces sources d'erreurs, il convient de mentionner les suivantes:

- absence de données pour certaines régions géographiques (voir Rapport 430);
- adoucissement des données brutes inhérent à la représentation mathématique;
- caractère incertain et variable de la relation entre les caractéristiques ionosphériques et l'indice d'activité solaire, aussi bien durant la phase croissante que durant la phase décroissante du cycle solaire, ainsi que d'un cycle à un autre;
- imperfections des méthodes de prévision de l'indice ou des indices d'activité solaire (voir l'Annexe à la Recommandation 371);
- différence entre la MUF de référence et la MUF d'exploitation (voir le § 2);
- insuffisance des méthodes utilisables pour tenir compte des variations statistiques des caractéristiques ionosphériques, y compris la valeur de la MUF de référence autour de la médiane mensuelle. Les distributions statistiques autour de la médiane mensuelle sont souvent assez étalées [King et Slater, 1973] et cet étalement n'est pas nécessairement proportionnel à la valeur de la médiane mensuelle;
- difficulté à passer des données obtenues sous incidence verticale aux données obtenues sous incidence oblique. La différence peut être très importante quand de forts gradients horizontaux et des inhomogénéités d'ionisation existent sur le trajet de transmission. On en trouvera des exemples dans les références [Möller, 1960; Williams, 1962].

2. Rapport entre la MUF d'exploitation et la MUF de référence

2.1 En général, il semble que le rapport de la MUF d'exploitation à la MUF de référence soit plus grand pendant la nuit que pendant les heures de jour, tandis qu'aux latitudes moyennes, ce rapport semble être plus petit en été, de jour comme de nuit, qu'en hiver pendant les heures de nuit. Les valeurs maximales de ce rapport pour les latitudes moyennes et élevées sont obtenues généralement en hiver. Le rapport a tendance à augmenter dans le cas de circuits passant au voisinage des zones aurorales.

On peut, en première approximation, décrire cette variation observée par une formule empirique fondée sur la dynamique de l'ionosphère, en fonction des variations de la MUF de référence [Beckmann, 1967; Beckmann et Ochs, 1969; Beckmann, 1970]. L'influence des irrégularités de l'ionosphère devient plus apparente au fur et à mesure de l'augmentation de la hauteur de la couche F2 et de la diminution de sa fréquence critique.

Des valeurs provisoires du rapport concordant largement avec les renseignements précités sont présentées dans le Tableau I. Il ne semble pas utile pour l'instant de prévoir des valeurs distinctes pour les trajets auroraux. Il est suggéré d'utiliser des valeurs qui soient appropriés aux conditions relatives au point milieu du trajet.

TABLEAU I – *Rapport entre la MUF d'exploitation médiane et la MUF de référence médiane*

	Eté		Equinoxe		Hiver	
Puissance isotrope rayonnée équivalente (dBW)	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour
≤ 30	1,20	1,10	1,25	1,15	1,30	1,20
> 30	1,25	1,15	1,30	1,20	1,35	1,25

Les différences entre la MUF d'exploitation et la MUF de référence peuvent s'expliquer par divers phénomènes ionosphériques, tels que la diffusion dans les régions E et F, la propagation en dehors du plan du grand cercle et la propagation par des modes inhabituels lorsqu'il existe des irrégularités d'ionisation dans les régions E et F. D'autre part, la présence de F-diffus peut être à l'origine de l'augmentation du rapport. Il est possible également que cet effet soit dû en partie au fait que les formules théoriques et les méthodes appliquées pour le tracé des rayons ne sont pas adéquates. Comme on pouvait s'y attendre, des comparaisons entre les valeurs observées et les valeurs prévues de la MUF révèlent des différences plus grandes que si l'on utilisait, pour calculer ces valeurs, des données réelles obtenues par sondage ionosphérique sous incidence verticale. Les erreurs dans la prévision de la MUF de référence ou de la MUF d'exploitation peuvent être dues aux inexactitudes des prévisions des caractéristiques ionosphériques; il s'ensuit qu'une source importante d'erreurs doit sans doute être recherchée dans la prévision des fréquences critiques et des hauteurs des couches, plutôt que dans la conversion en MUF de référence.

2.2 Le phénomène F-diffus peut être à l'origine des différences indiquées ci-dessus entre la MUF d'exploitation et la MUF de référence. Des cartes numériques de F-diffus ont été récemment établies aux Etats-Unis d'Amérique pour les années de forte et de faible activité solaire (voir Rapport 340).

La dispersion de la MUF de référence par rapport à la valeur médiane mensuelle accuse des variations analogues à celles de la probabilité d'occurrence de F-diffus. La dispersion de la MUF et la probabilité d'occurrence de F-diffus présentent les variations suivantes:

- maximum pendant les heures de nuit,
- maximum saisonnier en hiver ou à l'équinoxe, aux latitudes élevées,
- corrélation positive avec l'activité solaire aux latitudes élevées et corrélation négative aux latitudes moyennes et basses.

Le Groupe consultatif du réseau ionosphérique de l'URSI a établi des règles pour déterminer une caractéristique du phénomène F-diffus sous incidence verticale, fxI [Piggott et Rawer, 1972 et 1978]. Certaines administrations étudient l'application de cette caractéristique aux prévisions.

3. Modèles ionosphériques

Dans la Partie 8 du Rapport 340, on trouve un modèle de distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F, lequel ne fait intervenir que des caractéristiques ionosphériques faites seulement de mesures de routine ou de prévisions, à savoir M(3000)F2, foF2, foE et h'F(F2) [Bradley et Dudeney, 1973]. Ce modèle (voir la Fig. 1) est utile pour des études relatives aux télécommunications et pour des prévisions, mais il présente les insuffisances suivantes:

- une discontinuité du gradient se produit pour une fréquence de plasma égale à 1,7 foE;
- le profil est linéaire dans la région E-F;
- dans le cas où foE > foF2/1,7, le profil se réduit à une simple variation linéaire de hmE à hmF2.

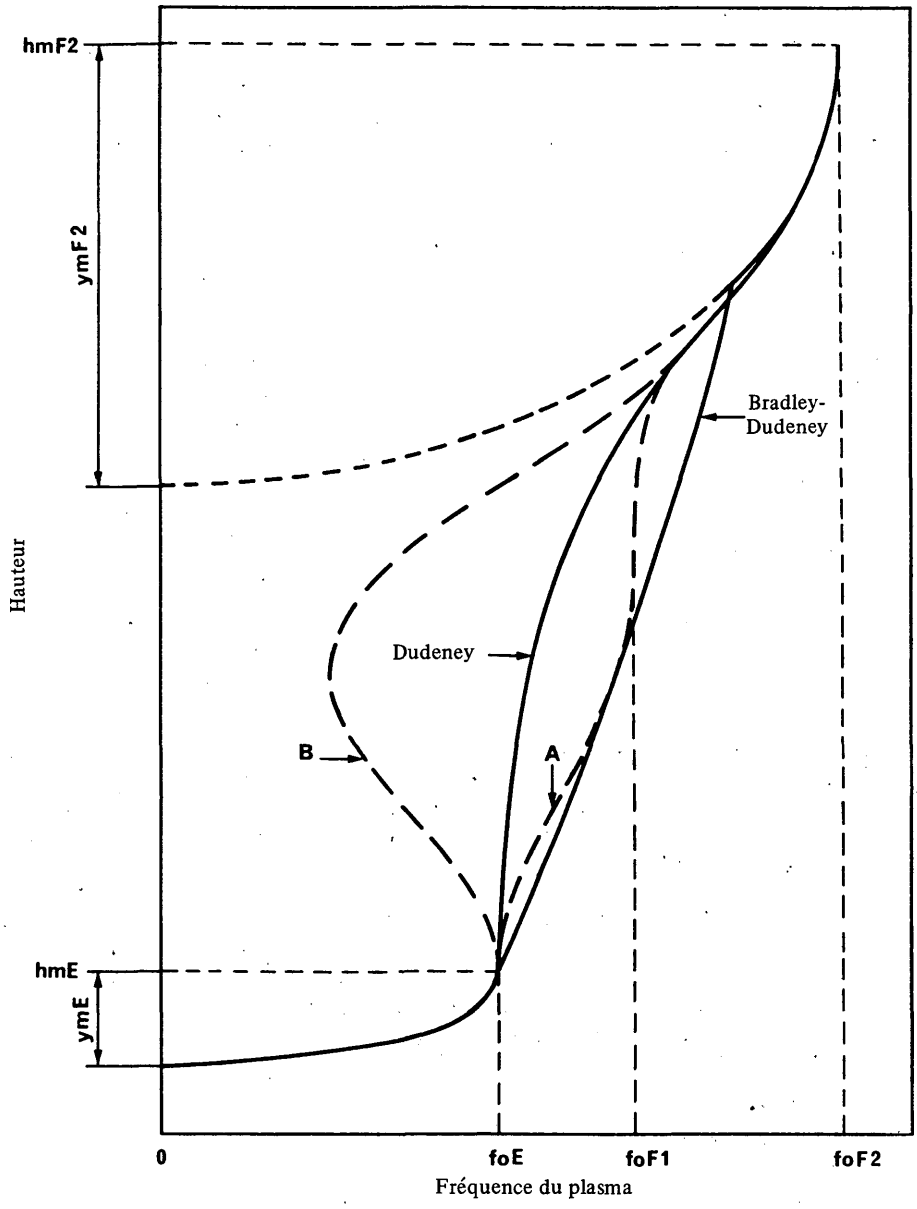


FIGURE 1 – *Comparaison des profils du modèle de Bradley-Dudeney et du modèle de Dudeney*

A: option «rebord»
B: option «vallée»

Il résulte de ce qui précède que les possibilités d'application du modèle sont limitées, surtout pour ce qui est des études du mode de propagation F1. On dispose aujourd'hui d'un nouveau modèle de profil qui évite ces difficultés tout en n'exigeant comme données d'entrée que des caractéristiques classiques de l'ionosphère [Dudeney, 1978]. La Fig. 1 montre une comparaison entre le profil de Bradley-Dudeney et le nouveau profil. Ce dernier consiste:

- en une couche E parabolique au-dessous de la hauteur maximale hmE, dont la demi-épaisseur est ymE;
- une couche F2 en cosinus, de hauteur maximale hmF2 et de demi-épaisseur ymF2;
- une croissance de la fréquence de plasma, selon une loi en sécante, de hmE jusqu'à une hauteur h_T à laquelle la courbe en sécante est tangente à la courbe de la couche F2;
- un terme optionnel en cosinus, entre hmE et h_T, qui, combiné avec la courbe en sécante, simule le rebord F1 ou la vallée E-F. Pour tracer le rebord, on a besoin de la valeur mesurée (ou prévue de foF1); pour la vallée, on doit choisir sa profondeur sous la forme d'une fraction de foE.

Le modèle de Dudeney présente l'avantage de fournir une simulation réaliste de la région E-F, ce qui fait qu'il convient particulièrement bien pour les études de propagation selon le mode F1; de plus, il ne contient aucune discontinuité artificielle du gradient. Il présente en revanche un inconvénient, à savoir qu'il faut recourir à des techniques numériques pour calculer ses paramètres et pour engendrer le profil de hauteur virtuelle correspondant.

4. Prévision de l'effet de l'ionisation de la région F sur les radiocommunications

4.1 Les prévisions à long terme de la propagation ionosphérique servant à la détermination de la MUF de référence de la couche F2 sont disponibles sous une forme graphique; elles portent sur les variations diurnes, saisonnières, undécennales et géographiques, pour des distances de transmission zéro et 4000 km (voir le Rapport 340, Oslo, 1966). Ces diagrammes ont été obtenus à partir de représentations mathématiques d'observations ionosphériques à incidence verticale; les représentations sont également disponibles sous forme de coefficients numériques à utiliser dans des programmes d'ordinateur (voir le Rapport 340).

Les études entreprises aux Etats-Unis d'Amérique et en URSS pour comparer les valeurs médianes mensuelles prévues de foF2 avec les observations faites à partir de stations de sondage ionosphérique installées au sol indiquent que les écarts de prévisions sont habituellement inférieurs à ± 15%, sauf aux latitudes élevées où ils peuvent parfois atteindre 40%. Un point faible des cartes numériques de foF2 semble être l'hypothèse selon laquelle une partie limitée à cinq ans du cycle solaire 19 permet de prévoir avec précision l'état de l'ionosphère pour d'autres cycles solaires. Des études faites en République populaire de Chine et au Royaume-Uni ont montré que l'utilisation, avec les cartes numériques de foF2, de l'indice ionosphérique IG_{12} au lieu de l'indice R_{12} pourrait peut-être corriger ce défaut et améliorer la précision des prévisions [Liu et autres, 1983] (voir le Vœu 82).

L'Inde a mis au point une méthode de prévision, trois mois à l'avance, de la médiane foF2 [Rao et Sain, 1965]. Cette méthode, qui ne nécessite pas la prévision de l'activité solaire, repose sur le rapport mensuel (RM) pour la valeur médiane de foF2 (rapport entre la valeur médiane de foF2 et la valeur médiane pour le mois précédent). Les valeurs médianes de foF2 calculées pour Kodaikanal au moyen de RM peuvent se comparer aux valeurs fondées sur I_{F2} et sont meilleures que les prévisions fondées sur R_{12}.

En URSS, les travaux se poursuivent sur l'évaluation de l'exactitude des prévisions à long terme pour foF2 par différentes méthodes. Les résultats préliminaires indiquent que la méthode de prévision de foF2 fondée sur des courbes cycliques mensuelles est plus précise que la méthode de prévision à long terme fondée sur le nombre de taches solaires [Novysh-Bylinskaya, 1966].

Aux Etats-Unis d'Amérique, on a établi de nouvelles cartes mondiales de foF2 en combinant des résultats d'observation de foF2, fournis par un réseau d'ionosondes à incidence verticale, avec des valeurs de foF2 déterminées d'après un modèle théorique, établi pour des zones dans lesquelles on ne disposait pas de résultats d'observation [Rush et autres, 1983, 1984].

L'Inde a étudié les variations de foF2 à midi à la verticale de Delhi pendant trois cycles solaires. Il apparaît que les valeurs de foF2 varient d'un cycle solaire à l'autre, pour des nombres de taches solaires analogues. L'analyse sur deux cycles solaires (1953-1975) de la relation foF2-R_{12} à midi pour Delhi donne à penser qu'il existe une variation significative à échelle de temps plus longue qu'un cycle solaire. Cette observation corrobore les résultats de Smith et King [1981]. Toutefois, une étude analogue, consacrée à la relation entre foF2 à midi et l'indice φ, suggère que cette variation est plus faible. Il convient d'approfondir l'étude de cette question pour différentes heures et différents endroits.

4.2 On a mis au point un système de prévision pour la couche F1 pour des distances de transmission comprises entre 2000 et 3400 km (voir le Rapport 340). On a constaté que foF1 subit une influence géomagnétique, que l'on a exprimée globalement par une formule empirique en fonction de la latitude géomagnétique [Du Charme et autres, 1973]. La comparaison de cette méthode de prévision avec les valeurs médianes mensuelles de foF1 observées pendant la période 1967-1969 dans 28 stations de sondage sous incidence verticale montre que, pour la plupart de ces stations, l'écart quadratique moyen est d'environ 0,2 MHz ou moins, l'erreur dans les régions équatoriales étant environ une fois et demie plus grande qu'aux latitudes élevées. Une autre méthode de prévision de foF1 et de la distance zénithale maximale du soleil à laquelle apparaît foF1 a été mise au point aux Etats-Unis d'Amérique [Rosich et Jones, 1973]. Ce modèle permet de prévoir les valeurs de foF1 avec une précision semblable à celle qui est indiquée ci-dessus mais il donne également une meilleure prévision de l'occurence de la couche F1. Elkins [1973] a constaté que, pour des stations situées à des latitudes élevées, foF1 atteint son maximum après midi (heure locale). La densité d'ionisation de la couche F1 présente une corrélation linéaire avec une activité magnétique faible à modérée.

L'URSS a mis au point une méthode nouvelle pour la détermination directe de foF1 à partir d'ionogrammes [Schepkin et Vinnitski, 1981].

5. Prévision de l'effet de l'ionisation dans la région E

5.1 Les effets de la couche E normale sur la propagation peuvent être déterminés au moyen d'une série de formules empiriques fonction de Φ (voir le Rapport 340). En Grèce, des formules empiriques correspondantes pour R_{12} et I_{F2} ont été obtenues par Kouris [1981a, b] et permettent de prévoir foE avec une précision comparable. Une représentation numérique de foE élaborée aux Etats-Unis d'Amérique [Leftin, 1976] permet de

prévoir la valeur diurne de foE avec une précision qui est compatible avec l'erreur estimée pour les observations. Ce système fournit une représentation continue de foE pour un cycle de 24 heures et également une représentation continue de la transition entre la nuit et le jour. En URSS [CCIR, 1978-82], on a établi des formules empiriques et des graphiques permettant de calculer foE pour les 24 heures et pour tous les niveaux d'activité solaire. Pour certaines valeurs de l'activité solaire, l'écart entre les valeurs observées et les valeurs calculées de foE ne dépasse pas 0,1 MHz.

5.2 En raison du caractère très variable de l'occurence et de l'intensité de l'ionisation sporadique de la région E, les systèmes de prévision disponibles sont fondés sur des méthodes statistiques. Cependant, l'influence de cette couche Es sur les radiocommunications est encore mal connue.

Il existe des cartes numériques de l'occurrence mondiale de la couche Es pour une activité solaire minimale et maximale, et de l'effet d'occultation de la couche sporadique Es pour une année d'activité solaire minimale (voir le Rapport 340). Un système de prévision, mis au point en URSS, qui permet de calculer la probabilité de réflexion sur la couche Es pour une onde de fréquence donnée, la fréquence de l'onde réfléchie avec une probabilité donnée, et la fréquence pour laquelle l'ionisation Es joue le rôle d'écran contre la réflexion sur les couches plus élevées [Kerblaï, 1960, 1964; Tchernichev, 1968; Tchernichev et Vasiljeva, 1973-74]. Une méthode de prévision de la valeur médiane de fbEs pour des latitudes tempérées a été mise au point en Argentine [Giráldez, 1979].

Il faut procéder avec prudence lorsqu'on applique à l'incidence oblique des données obtenues sous incidence verticale. Les études expérimentales faites en URSS [Nosova, 1973] et en République fédérale d'Allemagne [Mewes et Möller, 1974] indiquent que le rapport de la MUF à incidence oblique à la fréquence extrême de Es à incidence verticale est souvent plus grand que ce qu'on peut prévoir d'après la loi de la sécante.

La couche Es équatoriale est plus durable que les autres types d'ionisation; elle doit être incluse dans les prévisions de la MUF de référence [Kift, 1960]. En été, de jour, la fréquence maximale observée peut être déterminée par Es pour des trajets transéquatoriaux [Mewes et Möller, 1974].

Une analyse des observations de sondage sous incidence oblique, faite pendant plusieurs années, a montré que l'ionisation sporadique de la région E était utile pour la propagation sur un trajet transatlantique (Ottawa-La Haye) pendant moins de 1% du temps et sur un trajet transauroral (Winnipeg-Resolute) pendant 7% du temps seulement [Hagg et Rolfe, 1963]. Pike [1975] a étudié les possibilités d'utilisation d'images de la zone aurorale fournies par des satellites météorologiques, comme moyen de prévision et de spécification de l'apparition de la couche Es associée à l'ovale auroral. L'Annexe de la Recommandation 534 décrit une méthode de calcul de l'intensité des signaux propagés par les couches E sporadiques dans la bande des ondes métriques et dans la partie supérieure de la bande des ondes décamétriques.

6. Modes de propagation et autres facteurs

Les méthodes de calcul de la MUF de référence qui tiennent compte des modes de propagation donnent souvent des résultats plus exacts que celles où il n'en est pas tenu compte. Lorsqu'on utilise ces méthodes, il convient de tenir compte soigneusement de la diffusion et des réflexions au sol ainsi que des gradients horizontaux d'ionisation. L'emploi d'ordinateurs numériques très rapides a stimulé la mise au point de méthodes très variées de tracé des rayons et a permis de travailler avec des modèles d'ionosphère qui traduisent mieux la réalité que les représentations à deux ou trois paraboles.

Pour améliorer la précision des caractéristiques du trajet radioélectrique, des prévisions des paramètres géométriques des profils $N(h)$ de l'ionosphère calme et perturbée ainsi que des prévisions des hauteurs virtuelles de réflexion dans l'ionosphère et des écarts types de ces hauteurs ont été établies en URSS [Chapiero, 1960; Chapiero et autres, 1971a; Chapiero et Chashaunkina, 1971; Chapiero, 1970; Potapova, 1971; Chapiero et autres, 1971b]. Une méthode analytique de calcul des trajets des rayons a été indiquée par Chvojková [1969].

Les trajectoires des rayons dans une ionosphère ayant un gradient horizontal d'ionisation, observées par Bibl [1964], Kerblaï et Volochinova [1964] ont été calculées [Kerblaï et Kovalevskaïa, 1967; Kovalevskaïa et Kornitzkaïa, 1969]. Le tracé des rayons a montré que, dans la plupart des cas, des inhomogénéités de dimensions convenables donnent lieu à une augmentation de plusieurs MHz de la MUF de référence et à des différences entre angles d'arrivée et de départ allant jusqu'à 7°; on a constaté aussi que l'augmentation prévue de l'affaiblissement d'espace dû aux inhomogénéités, surtout pour le rayon propagé sous un grand angle et lorsque la fréquence augmente, concorde bien avec les résultats observés. Rao et Beckwith [1974] ont étudié, expérimentalement et théoriquement, les écarts de l'angle d'arrivée pendant la période du lever du Soleil. On dispose en URSS d'une méthode de prévision tenant compte du gradient de densité électronique dans une direction arbitraire; on peut ainsi faire des prévisions de la longueur des bonds, des angles d'émission et d'arrivée, en azimut et en site, ainsi que de la MUF dans une ionosphère horizontalement inhomogène [Kovalevskaïa et Kerblaï, 1971].

Il ne faut pas oublier que la relation de la MUF d'exploitation avec la MUF de référence dépend du type de service et de la puissance apparente rayonnée, ainsi que du champ minimal nécessaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BECKMANN, B. [1967] Notes on the relationship between the receiving-end field strength and the limits of the transmission frequency range MUF, LUF. *NTZ-Comm. J.*, **6**, 37-47.

BECKMANN, B. [1970] FTZ-Report A445-TBR8.

BECKMANN, B. et OCHS, A. [1969] Vorhersage der ionosphärischen Kurzwellenausbreitung (Prévision de la propagation ionosphérique des ondes courtes). *Jahrbuch des elektrischen Fernmeldewesens*, 281-365.

BIBL, K. [1964] Détection d'importantes anomalies dans la région F d'ionisation au-dessus de l'Europe centrale. *Ann. de Géophys.*, **20**, 447-453.

BRADLEY, P. A. et DUDENEY, J. R. [1973] A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 2131-2146.

CHAPIERO, B. S. [1960] De la question de l'établissement de prévisions de paramètres géométriques (hm et ym) et des caractéristiques $h'f$ de l'ionosphère (en russe). Documents de l'IZMIRAN, publiés par l'Académie des Sciences, 17/7, 216-239, URSS.

CHAPIERO, B. S. [1970] Relation entre les paramètres des régions F2 et F1 et prévision des profils diurnes $N(h)$ et des caractéristiques $h'f$ (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, **2**, 344-346.

CHAPIERO, B. S., ANUFRIEVA, T. A., FREISON, A. A. et VINNIKOVA, T. A. [1971a] Prévision des paramètres géométriques des profils $N(h)$ et des caractéristiques $h'f$ de l'ionosphère calme et perturbée. I. Variations régulières des paramètres géométriques $N(h)$ et $h'f$. Publié dans la série *Les perturbations ionosphériques et leur influence sur les radiocommunications*, (en russe), Nauka Publishing House, 100, Moscou, URSS.

CHAPIERO, B. S. et CHASHANKINA, V. M. [1971] Prévision des profils de $N(h)$ et des caractéristiques $h'f$ pour la région F, calme et perturbée. III. Paramètres $N(h)$ et $h'f$ pendant les perturbations. Publié dans la série «*Les perturbations ionosphériques et leur influence sur les radiocommunications*» (en russe). Nauka Publishing House, 135, Moscou, URSS.

CHAPIERO, B. S., POTAPOVA, N. I., ANUFRIEVA, T. A., FREISON, A. A. et CHASHAUNKINA, V. M. [1971b] Prévision des profils $N(h)$ et des caractéristiques $h'f$ de la région F calme et perturbée. IV. Variations des angles d'incidence (A) et de la distance des bonds (D). Publié dans la série *Les perturbations ionosphériques et leur influence sur les radiocommunications* (en russe), Nauka Publishing House, 146, Moscou, URSS.

CHVOJKOVÁ, E. [1969] Formulae for ray path in ionized layers with application to oblique ionogram and duct modes. *Radio Sci.*, Vol. 4, 23-27.

DU CHARME, E. D., PETRIE, L. E. et EYFRIG, R. [1973] A method for predicting the F1 layer critical frequency based on the Zurich smoothed sunspot number. *Radio Sci.*, Vol. 8, (New Series), 837-839.

DUDENEY, J. R. [1978] An improved model of the variation of electron concentration with height in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 195-203.

ELKINS, T. J. [1973] An empirical model of the polar ionosphere. Air Force Surveys in Geophysics, N° 267, NTIS Accession N° AD 766240, National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

GIRÁLDEZ, A. E. [1979] Daytime sporadic-E blanketing frequency prediction, International Solar Terrestrial Predictions Workshop Proc., Vol. IV, Boulder CO, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

HAGG, E. L. et ROLFE, W. [1963] A study of transatlantic radio propagation modes at 41.5 Mc/s. *Can. J. Phys.*, **41**, 220-233.

KERBLAÏ, T. S. [1960] Relation entre les fréquences critiques de la couche Es et les caractéristiques des appareils (en russe). *Etudes ionosphériques*, **5**, 50-63.

KERBLAÏ, T. S. [1964] Indications sur le calcul des radiocommunications à ondes décamétriques réfléchies par la couche Es (en russe), *Science*, Moscou, URSS.

KERBLAÏ, T. S. et KOVALEVSKAÏA, E. [1967] Calcul de la MUF en présence de non-homogénéités horizontales dans l'ionosphère (en russe), *Geomag. i Aeronom.*, **7**, 123-127.

KERBLAÏ, T. S. et VOLOCHINOVA, E. [1964] Evaluation de l'inclinaison des surfaces correspondant à une même valeur de NF2 d'après les profils de densité d'ionisation (Nh) (en russe), *Geomag. i Aeronom.*, **1**, 61.

KIFT, F. [1960] The propagation of high frequency radiowaves to long distance. *Proc. IEE*, **107B**, 127-140.

KING, J. W. et SLATER, A. J. [1973] Erreurs sur les valeurs prévues de foF2 et hmF2 comparées à la variabilité observée d'un jour à l'autre. *J. des Télécomm.*, Vol. 40, 766-770.

KOURIS, S. S. [1981a] Solar and latitude dependance of E region critical frequency. *Nuovo cimento C*, Vol. 4, 417-430.

KOURIS, S. S. [1981b] On the prediction of the E-layer critical frequency- *Alta Frequenza*, Vol. 50, **5**, 276-278.

KOVALEVSKAÏA, E. et KERBLAÏ, T. S. [1971] *Calcul de la distance de saut, de la MUF et des angles d'arrivée des ondes, compte tenu des irrégularités horizontales de l'ionosphère* (en russe), Nauka Publishing House, Moscou, URSS.

KOVALEVSKAÏA, E. et KORNITZKAÏA, A. A. [1969] Influence des gradients horizontaux de la distribution de la densité électronique sur la valeur de la MUF, la longueur des bonds et les angles d'arrivée (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, **9**, 232-235.

LEFTIN, M. [1976] Numerical representation of monthly median critical frequencies of the regular E region (foE). Office of Telecommunications Rpt, 76-88, Supt. of Documents US Govt. Printing Office, Washington, DC, 20402.

LIU, R. Y., SMITH, P. A. et KING, J. W. [1983] Un nouvel indice solaire dont l'utilisation améliore les prévisions de foF2 fondées sur l'Atlas du CCIR. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, **VIII**, 408-414.

MEWES, E. R. et MÖLLER, H. G. [1974] Der Einfluss der sporadischen E-Schicht auf eine transäquatoriale Kurzwellen-Übertragung (Influence de la couche E sporadique sur la propagation transéquatoriale des ondes décamétriques). *Kleinheubacher Berichte*, **17**, 443-447.

MÖLLER, H. G. [1960] Ergebnisse der Impulsübertragung mit veränderlicher Frequenz auf der Strecke Sodankylä-Lindau (Résultats d'émissions d'impulsions à fréquence variable sur le trajet Sodankylä-Lindau). *Kleinheubacher Berichte*, **7**, 115-123.

NOSOVA, G. N. [1973] Evanouissements des signaux réfléchis et diffusés sur la couche E sporadique (en russe). Recueil d'articles «Problèmes de la propagation des ondes courtes», IZMIRAN, URSS.

NOVYSH-BYLINSKAYA, V. N. [1966] Tsiklicheskie krivye kriticheskikh chastot sloya F2 ionosfery kak osnova dlya prognozirovaniya foF2 na lyubuyu fazu solnechnogo tsikla (courbes des fréquences critiques de la couche ionosphérique F2 en fonction du cycle solaire servant de base pour la prévision de foF2 à un moment quelconque du cycle solaire) *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 6, **2**, 392.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] URSI Handbook of Ionogram interpretation and Reduction. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO. 80303, Etats-Unis d'Amérique.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] URSI Handbook of Ionogram interpretation and Reduction (2nd Ed.) Revision of Chapter 1-4 – World Data Center A for solar Terrestrial Physics; Rep. UAG-23A, NOAA, Boulder, CO. 80303, Etats-Unis d'Amérique.

PIKE, C. P. (Ed.) [1975] Defense meteorological satellite program auroral ionospheric interpretation guide. Air Force Surveys in Geophysics, N° 306, NTIS Accession N° AD A013165, National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

POTAPOVA, N. I. [1971] Prévision des paramètres géométriques pour des profils de $N(h)$ et des caractéristiques $h'f$ de l'ionosphère calme et perturbée. II. Variations quotidiennes des paramètres $N(h)$ et $h'f$. Publié dans la série *Les perturbations ionosphériques et leur influence sur les radiocommunications* (en russe), Nauka Publishing House, 117, Moscou, URSS.

RAO, N. N. et BECKWITH, R. I. [1974] Prediction of azimuthal angle of arrival of HF waves during the sunrise period. *Radio Sci.*, Vol. 9, 617-620.

RAO, C. S. R. et SAIN, M. [1965] Prediction of critical frequency of F2- layer (Prévision de la fréquence critique de la couche F2). *J. Inst. Telecomm. Engrs.*, (Inde), Vol. 2, **8**, 271-281.

ROSICH, R. K. et JONES, W. B. [1973] The numerical representation of the critical frequency of the F1 region of the ionosphere. Office of Telecommunications, Report 73-22, US Dept. of Commerce.

RUSH, C. M., POKEMPNER, M., ANDERSON, D. N., STEWART, F. G. et PERRY, J. [1983] Improving ionospheric maps using theoretically derived values of foF2, *Radio Sci.*, Vol. 18, 95-107.

RUSH, C. M., POKEMPNER, M., ANDERSON, D. N., PERRY, J., STEWART, F. G. et REASONER, R. [1984] Maps of foF2 derived from observations and theoretical data, *Radio Sci.*, Vol. 19, 1083-1097.

SCHEPKIN, L. A. et VINNITSKI, A. V. [1981] O vyvedenii parametra foF1 iz ionogramm. (Détermination de foF1 à partir d'ionogrammes). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 21, **2**, 359.

SMITH, P. A. et KING, J. M. [1981] Long-term relationships between sunspots, Solar faculae and the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 43, **10**, 1057-1063.

TCHERNICHEV, O. V. [1968] Courbes de distribution de foEs (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, **8**, 902-903.

TCHERNICHEV, O. V. et VASILJEVA, T. N. [1973-74] Prévision de la fréquence maximale utilisable (en russe). Nauka Publishing House, V. 1-2, Moscou, URSS.

WILLIAMS, H. P. [1962] Increase in MUF for two-hop transatlantic propagation due to horizontal gradients. *Nature*, Vol. 196, **4851**, 256-258.

Documents du CCIR

[1978-82]: 6/64 (URSS).

BIBLIOGRAPHIE

CHAMAN LAL [1966] Etablissement d'une formule relative aux caractéristiques saisonnières et séculaires de la fréquence critique de la couche F2 (Σ foF2). *J. des Télécomm.*, Vol. 33, 257-262.

MESTERMAN, I., TRENTINI, F. et FERNANDEZ SARMIENTO, N. [1972] Planificación de redes antárticas para telecomunicaciones en ondas decamétricas (Planning of Antarctic HF Telecommunication nets). LIARA-C18. (disponible en anglais) (Laboratorio Atmosférico de la Armada, Argentina).

RAPPORT 430-4

AMÉLIORATION DU PROGRAMME MONDIAL D'OBSERVATIONS IONOSPHÉRIQUES POUR LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE

(Programme d'études 26C/6)

(1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Les améliorations des prévisions ionosphériques à court terme et à long terme sont subordonnées au fait que l'on puisse disposer de nouvelles sources d'observations ionosphériques et perfectionner les méthodes de cartographie et de prévisions ionosphériques. Ces méthodes pourraient être sensiblement améliorées si l'on développait le réseau actuel d'ionosondes installées au sol et si l'on complétait les mesures d'ionisation sous incidence verticale par des données ionosphériques recueillies avec des satellites et par d'autres techniques appropriées.

2. Répartition géographique des ionosondes au sol

Le réseau d'ionosondes en service au moment où le Rapport 340 a été rédigé a fourni un échantillonnage raisonnable de données de base pour environ un tiers de la surface de la Terre. Depuis lors, 15 nouvelles ionosondes environ sont entrées en service et les données recueillies par ces stations d'observation devraient être reportées sur les cartes numériques. Cette couverture mondiale révèle néanmoins qu'il subsiste des lacunes qui correspondent aux zones maritimes et aux régions terrestres à faible densité de population, notamment la zone d'anomalie équatoriale, la région d'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud, l'Antarctique et les zones subaurorales. On pourrait d'ailleurs assurer la couverture de ces régions au moyen d'ionosondes non surveillées qui effectueraient automatiquement la mesure, la réduction, le traitement et la transmission des caractéristiques ionosphériques intéressantes, sous forme numérique. Il est maintenant possible d'obtenir automatiquement des profils de densité électronique avec les ionosondes numériques modernes [Bibl et Reinisch, 1978; Reinisch et Huang, 1982a]. Les données obtenues au moyen de sondages par rétrodiffusion et de sondages sous incidence oblique pourraient aussi présenter un grand intérêt.

Wright [1981] a proposé un réseau mondial de 88 stations, qui tiendrait compte des restrictions imposées par les océans et par les déserts. Il faudrait probablement un nombre beaucoup plus grand de stations dans les zones où l'ionosphère change rapidement d'un emplacement à l'autre, à moins que l'on ne puisse faire dans toutes les stations un ensemble mixte de mesures par sondages obliques et verticaux.

Rush [1976], à la suite des travaux de Gautier et Zacharisen [1965], a abouti à la conclusion que, en utilisant un réseau installé au sol pour des prévisions à court terme, il faudrait observer foF2 tous les 1000 km dans le sens nord-sud et tous les 2000 km dans le sens est-ouest pour réduire de 50% l'erreur de prévision des valeurs journalières de foF2 en un emplacement lointain. Pour parvenir à ce degré d'amélioration dans le cas de l'ionosphère aux latitudes moyennes il faudrait un réseau d'observation tel que l'on puisse faire des mesures de l'ionosphère de 10 en 10 degrés de latitude et de 20 en 20 degrés de longitude. On pourrait constituer facilement un réseau de cette étendue en modifiant assez peu les emplacements d'ionosondes en Europe occidentale et en URSS. Il serait toutefois nécessaire de coordonner les observations et de les envoyer dans un bref délai à un centre pour diffusion à tous les usagers.

3. Qualité des données

Une attention constante est nécessaire pour maintenir la qualité des données recueillies par les stations de sondages ionosphériques. Les données communiquées par une station de sondages ionosphériques ne sont statistiquement valables que si l'on applique soigneusement les règles établies pour le dépouillement et la diffusion des enregistrements et si leur nombre et leur continuité sont suffisants pour obtenir des médianes mensuelles significatives.

Le Groupe consultatif pour le réseau d'ionosondes (INAG) de la Commission G de l'URSI est chargé d'étudier les problèmes scientifiques qui concernent le réseau de stations de sondage basées au sol (incidence verticale) et, le cas échéant, de recommander les mesures à prendre. Ce Groupe [Piggott et Rawer, 1972, 1978; Piggott, 1975] a recommandé quelques modifications aux règles appliquées précédemment pour la réduction des ionogrammes.

4. Utilisation des données obtenues par des sondeurs en contre-haut et autres données recueillies par satellites

Les données obtenues par des sondeurs en contre-haut embarqués à bord de satellites sont de nature à améliorer les prévisions ionosphériques car elles fournissent des renseignements sur:

- la distribution mondiale de foF2, susceptible de compléter les informations fournies par des stations au sol, car les données ainsi collectées peuvent être distribuées plus uniformément en fonction de la latitude et de la longitude;
- les gradients moyens de foF2 et de hmF2 en vue d'extrapoler de façon plus précise les données obtenues par les ionosondes installées au sol;
- les systèmes de coordonnées géographiques ou magnétiques qui permettraient de représenter de façon plus précise des caractéristiques ionosphériques au moyen de méthodes de cartographie numérique;
- la mesure dans laquelle les variations de caractéristiques ionosphériques mesurées sous incidence verticale dépendent des déplacements de phénomènes localisés tels que les crêtes ou les creux d'ionisation de la couche F2 dans les régions équatoriales et de haute latitude. Les données auxiliaires, telles que la densité et la température électroniques, le contenu électronique total de l'ionosphère et les gradients d'ionisation pourraient être également appliquées à la cartographie surtout si les mesures sont faites simultanément.

Un grand nombre des caractéristiques observées par les ionosondes en contre-haut et applicables aux problèmes de cartographie ionosphérique ont été étudiées dans les Proceedings IEEE [IEEE, 1969]. En Australie et au Japon, on a étudié la compatibilité des données fournies respectivement par des ionosondes basées au sol et par des ionosondes en contre-haut, sur la base de résultats fournis par les satellites Alouette [Nishizaki et Nagayama, 1969]; ces mêmes études ont été effectuées en Australie, au Japon et au Royaume-Uni sur la base des résultats fournis par les satellites ISIS-1 et ISIS-2. Des résultats de sondage en contre-haut, obtenus aux latitudes équatoriales, moyennes et polaires [Burge et autres, 1973] ont permis d'établir des cartes de foF2 pour des heures locales constantes. Au Japon, Matuura et autres [1981] et Wakai et Matuura [1980] ont établi des cartes mondiales de foF2 sur la base de données de sondage en contre-haut provenant du satellite ISS-b. Des méthodes de cartographie numérique mises au point aux Etats-Unis d'Amérique [Jones et Obitts, 1970; Jones et Stewart, 1970; Flattery et Ramsay, 1975] permettent d'associer des données recueillies au sol et des données fournies par des sondages en contre-haut.

On a également signalé des progrès accomplis en matière de sondage numérique en contre-haut, au titre d'un projet comportant le traitement automatique d'ionogrammes en contre-haut [Mathwick et autres, 1981; Reinisch et Huang, 1982b]. De trois à cinq sondeurs numériques en contre-haut, associés à un réseau mondial, installé au sol, d'ionosondes modernes télécommandées, fourniraient un modèle ionosphérique mondial mis à jour en permanence.

Le satellite Ariel-3 a fait des observations de la fréquence de plasma [Piggott, 1970; Sayers, 1970], observations qui montrent que le rapport fréquence du plasma/foF2, à des longitudes différentes et pour la même heure locale, est à peu près constant d'un jour à l'autre. Cette caractéristique peut être utilisée pour déterminer les caractéristiques ionosphériques dans des régions lointaines, sur la base d'observations faites au sol. Par ailleurs, on a fait un petit nombre de calculs théoriques qui semblent indiquer que l'extrapolation des valeurs de foF2 fournies par des satellites dépend nettement de la température électronique et de l'heure locale [King, 1973]. Une relation théorique a été établie entre les vents neutres et la distribution de la densité électronique [Rishbeth et Kelley, 1971]. On se sert de cette théorie pour déterminer les variations de la hauteur d'ionisation maximale en fonction de la longitude et obtenir ainsi les valeurs de foF2 d'après les fréquences de plasma observées au niveau du satellite.

D'autres types de données, notamment des observations de la luminescence atmosphérique, [Daniell et autres, 1984; McCoy et Anderson, 1984] pourraient fournir d'autres informations utiles sur les variations spatiales de l'ionisation. Des cartes pour la prévision de l'intensité de la luminescence atmosphérique ont été établies d'après les coefficients numériques de M(3000)F2 et foF2; on a comparé ces cartes à des données recueillies au cours d'observations effectuées au moyen des satellites OGO-4 et OGO-6 [Thuillier et autres, 1976]. Les variations observées (par exemple la structure fine en longitude) au-dessus des régions océaniques, particulièrement dans l'hémisphère austral, révèlent des caractéristiques qui diffèrent quelque peu de celles indiquées dans les prévisions du CCIR. On pourrait, pour améliorer l'exactitude des prévisions, recourir à des comparaisons de ce type et établir une théorie ionosphérique appropriée.

Il convient toutefois de noter que les observations faites par un satellite sont limitées à la distance à laquelle elles peuvent être extrapolées au-delà du point de projection de l'engin spatial à la surface de la Terre. Pour parvenir à une amélioration notable des prévisions dans les zones inaccessibles, en particulier des prévisions à court terme, il serait nécessaire de disposer d'un grand nombre d'engins spatiaux et d'équipements terriens perfectionnés. Il a été établi que les observations faites à partir de satellites sont extrêmement utiles pour définir avec certitude et précision certaines caractéristiques de la structure de l'ionosphère, notamment celles qui sont liées aux gradients de densité électronique en rapport avec l'anomalie équatoriale et le creux d'ionisation aux latitudes moyennes [Piggott, 1969]. Des observations de ce genre sont d'une très grande valeur dans le cas des régions inaccessibles aux moyens d'observation à partir du sol.

Les photographies à très grande échelle des aurores, prises récemment par les satellites DMSP des Etats-Unis d'Amérique, laissent entrevoir la possibilité de dresser des cartes des zones d'irrégularité de la région F et du creux des latitudes moyennes. Ces documents photographiques sont disponibles aux archives du National Geophysical and Solar-Terrestrial Data Center de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) à Boulder, Colorado 80303, Etats-Unis d'Amérique.

En se fondant sur environ 10^6 ionogrammes du satellite Alouette-1, on a mis au point un modèle ionosphérique pour l'Amérique du Nord, pour les fréquences foF2 et F-diffus [Muldrew et autres, 1978]; Gladwin, 1980]. Des bandes magnétiques de données réduites et de programmes d'ordinateur (FORTRAN) sont disponibles. Gladwin [1980] a mis au point un modèle qui donne une estimation approchée de l'épaisseur de la couche, à partir de 10^4 à 10^5 profils de la densité électronique et d'un modèle simple du profil inférieur. Pour la partie de l'hémisphère Nord comprise entre les longitudes 180° O et 45° O (à l'exclusion des basses latitudes dans l'océan Pacifique), on peut obtenir, pour chaque heure locale, la valeur de foF2, un indice F-diffus et l'épaisseur de la couche; les paramètres d'entrée sont le mois, l'indice k_p, le nombre de taches solaires et l'emplacement.

5. Contenu électronique total

Des cartes du contenu électronique total sont nécessaires pour prévoir les effets de l'ionosphère sur les liaisons satellite-Terre. Des mesures du contenu électronique total ont été faites dans de nombreuses stations par observation de l'effet Faraday ou de l'effet Doppler sur des signaux provenant de satellites géostationnaires ou à orbites basses. Des cartes du contenu électronique total ont été établies pour l'ionosphère à latitude moyenne [Amayenc et autres, 1971; Klobuchar, 1973; Soicher et Gorman, 1984]. Des observations de la variation en latitude du contenu électronique total, dans différentes régions équatoriales, ont été décrites dans les comptes rendus du Troisième Colloque international sur l'aéronomie équatoriale [Physical Research Laboratory, 1969], et par Golton et Walker [1971]. On trouvera d'autres informations sur le contenu électronique total dans le Rapport 263.

6. Précision des cartes numériques du CCIR pour foF2 et hmF2

Des comparaisons ont été faites [Burge et autres, 1973; King, 1973] entre des résultats d'observations par satellite des fréquences du plasma et les cartes numériques de foF2; ces comparaisons montrent que les écarts moyens sont généralement faibles mais aussi que, dans certaines régions océaniques, notamment le Pacifique Sud, et dans l'hémisphère Sud, de nuit, les prévisions présentent une erreur donnant des valeurs qui peuvent aller du simple au double.

Les écarts par rapport aux valeurs médianes ou aux valeurs moyennes prévues de foF2 sont généralement déterminés lorsqu'on utilise les résultats de mesure provenant d'un réseau de stations d'observation pour prévoir à court terme les caractéristiques d'exploitation. L'amélioration que l'on obtiendra finalement dans la prévision de ces caractéristiques dépend donc en partie de l'écart entre les valeurs journalières observées et les valeurs mensuelles prévues de foF2.

L'analyse cartographique mondiale a été appliquée aux valeurs de la différence entre la valeur observée de foF2 déduite des sondages du satellite ISS-b et la foF2 prévue en chaque point d'observation selon la méthode du CCIR. Les résultats de cette analyse (tels qu'ils sont reproduits aux Fig. 1 et 2) pour la période comprise entre le 11 août et le 12 décembre 1978) sont les suivants: dans la région du Pacifique Sud, la foF2 observée tend à être supérieure à la foF2 prévue, alors que la situation est inverse dans les régions de l'Amérique du Sud et de l'Atlantique Sud ainsi qu'au voisinage de l'équateur magnétique. [Matuura, 1980]; on remarque en outre que, dans l'hémisphère Nord, les zones où les différences de fréquence sont sensibles ont tendance à apparaître à des heures locales déterminées [Matuura et autres, 1981].

En comparant des mesures in situ de la densité électronique de l'ionosphère effectuées à bord des satellites Aeros-A et B avec les cartes numériques du CCIR, on a constaté aussi l'existence de divergences assez notables là où les données provenant de stations au sol étaient insuffisantes. Ces divergences étaient particulièrement importantes au-dessus du Pacifique et aux latitudes plus basses dans la ceinture équatoriale [Sheikh et autres, 1978].

Rush et autres [1984] ont établi de nouvelles cartes mondiales de foF2 en combinant des valeurs médianes mensuelles de foF2 fournies par des observations sous incidence verticale avec des valeurs de foF2 obtenues à partir de l'équation de continuité temporelle pour les ions (et les électrons) en des lieux pour lesquels on ne possédait pas de données. Dans les régions inaccessibles pour des observations systématiques, les nouvelles cartes numériques donnent pour foF2 des valeurs qui diffèrent très sensiblement de celles fournies par les cartes numériques du CCIR. Des tests limités de validation ont montré que pour ces régions inaccessibles, les nouvelles cartes numériques fournissent pour foF2 des valeurs bien meilleures.

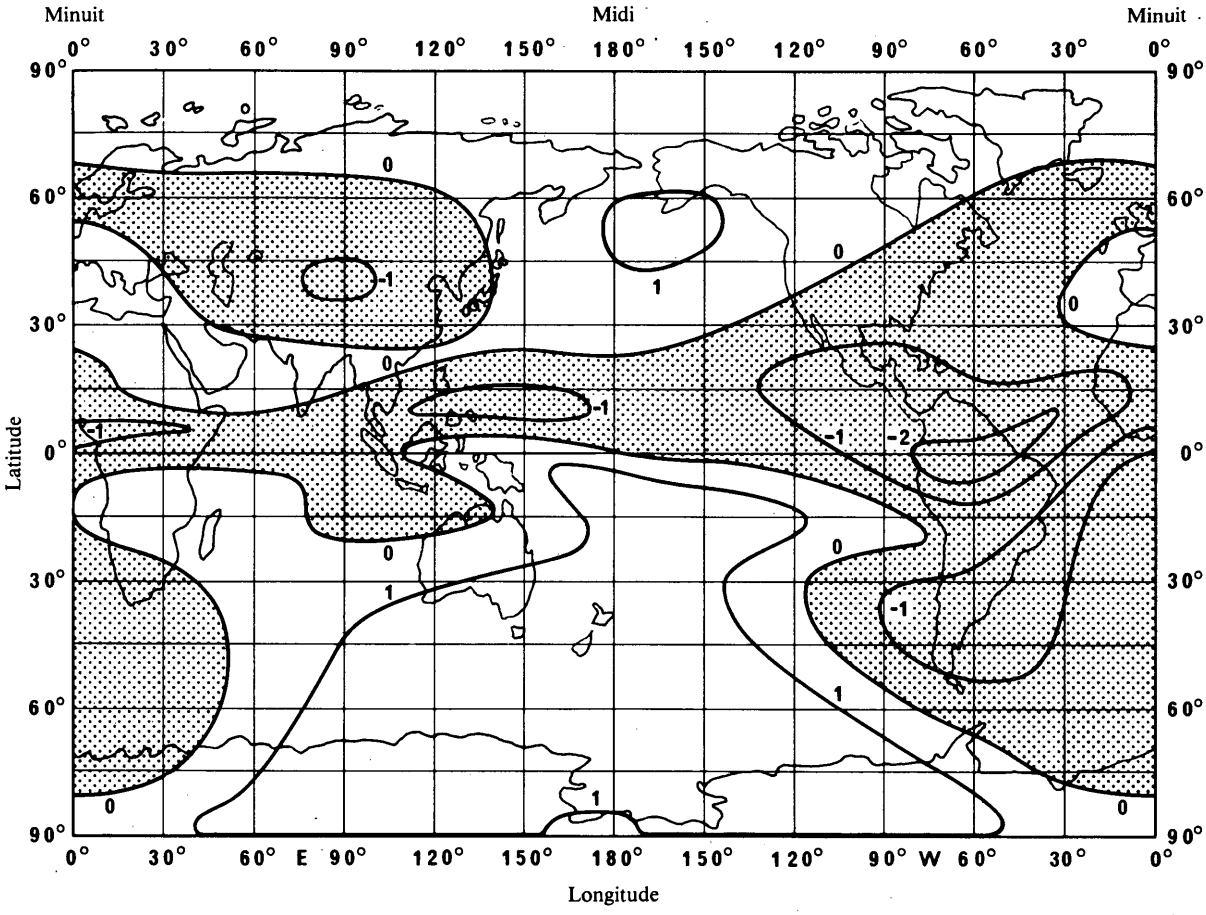


FIGURE 1 – *Carte UTC de la différence* Δf *(=* $f_{ISS} - f_{CCIR}$*)*

Les parties grisées indiquent les régions où cette différence est négative.

00 h 00, 11 août 1978 - 12 décembre 1978

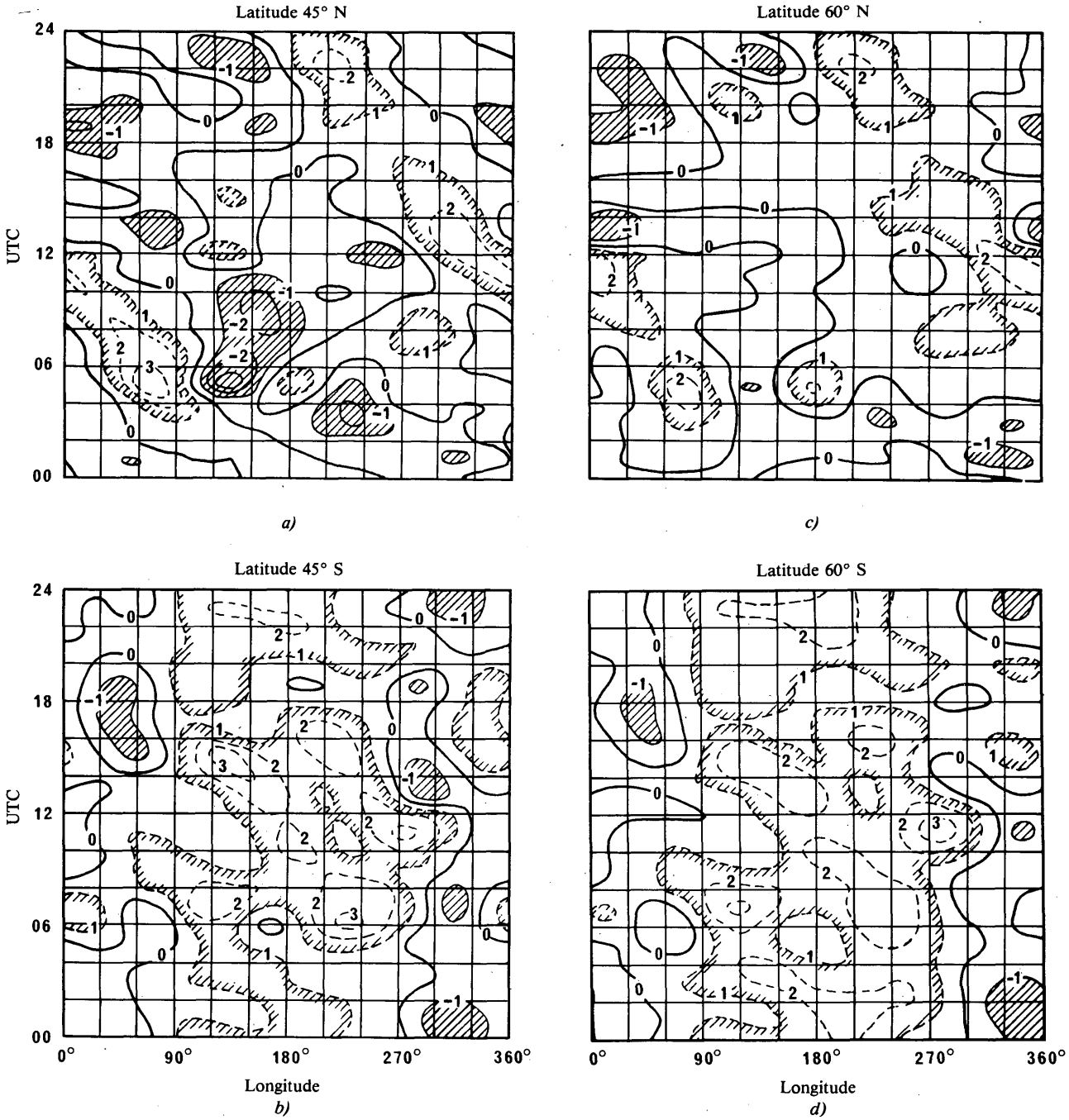


FIGURE 2 – *Répartition de la différence ΔfoF2 (= fISS – fCCIR) en fonction de la longitude géographique et du temps universel (UTC) pour quatre latitudes différentes. Contours de ΔfoF2 MHz par MHz. Les courbes en traits continus correspondent à ΔfoF2 = 0, les parties hachurées à ΔfoF2 ≤ – 1 MHz, et les parties partiellement hachurées avec traits discontinus à ΔfoF2 ≥ 1 MHz*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMAYENC, P., BERTIN, F. et PAPET-LEPINE, J. [1971] Sur l'évolution latitudinale du contenu électronique de l'ionosphère. *Ann. de Géophys.*, **27**, 345-357.

BIBL, K. et REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.

BURGE, J. D., KING, J. W. et SLATER, A. J. [1973] Cartographie de foF2 au moyen de satellites de sondage par le haut. *J. des Télécomm.*, **40**, 356-363.

DANIELL, Jr., R. E., STRICKLAND, D. J., et JASPERSE, J. R. [1984] Global monitoring of the ionosphere by optical techniques. *The Ionospheric Effects Symposium*, Ed. par J.M. Goodman, 276-287.

FLATTERY, T. W. et RAMSAY, A. C. [1975] Derivation of total electron content for real-time global applications. Proc. Symposium on the Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications, NRL, Arlington, VA, Etats-Unis d'Amérique.

GAUTIER, T. N. et ZACHARISEN, D. H. [1965] Use of space and time correlations in short-term ionospheric predictions. Conference Record, First Annual IEEE Communications Convention.

GLADWIN, J. C. [1980] An F-layer model of the ionosphere for North America, Communications Research Centre Report, N° 1337, Dept. of Communications, Ottawa, Ontario, Canada.

GOLTON, E. et WALKER, G. O. [1971] Observations of ionospheric electron content across the equatorial anomaly at sunspot minimum. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 1-11.

IEEE [1969] Topside sounding and the ionosphere. *Proc. IEEE*, **57**, 859-1171.

JONES, W. B. et OBITTS, D. L. [1970] Global representation of annual and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecommunications Research Report OT/ITSRR3, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.

JONES, W. B. et STEWART, F. G. [1970] A numerical method for global mapping of plasma frequency. *Radio Sci.*, **5**, 773-784.

KING, J. W. [1973] Détermination de foF2 et hmF2 à partir de données recueillies par des sondes portées par des satellites. *J. des Télécomm.*, **40**, 364-368.

KLOBUCHAR, J. A. [1973] Total electron content studies of the ionosphere. Report TR-73-0098. Air Force Cambridge Research Labs., Bedford, MA, Etats-Unis d'Amérique.

MATHWICK, H. R., AUBERT, D. E., MARTZ, A. F., BIBL, K., REINISCH, B. W. et LEWIS, D. [1981] An advanced mission to map the worldwide topside ionosphere. *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems.* Ed. J.M. Goodman. US Govt. Printing Office, Library of Congress, Catalog No. 82-600510.

MATUURA, N. [1980] Characteristics on global distribution of foF2 based on topside sounding by ISS-b, Proc. Highlights of the Japanese IMS Programme, Institute of Space and Aeronautical Science, Univ. of Tokyo, 239-247.

MATUURA, N., KOTAKI, M., MIYAZAKI, S., SAGAWA, E. et IWAMOTO, I. [1981] ISS-b experimental results on global distributions of ionospheric parameters and thunderstorm activity. *Acta Astronautica*, Numéro spécial du 31e Congrès de la FAI, Tokyo, Vol. 8, **5-6**, 527-548.

McCOY, R. P., et ANDERSON, Jr., D. E. [1984] Ultraviolet remote sensing of the F2 ionosphere. *The Ionospheric Effects Symposium.* Ed. par J.M. Goodman, 295-302.

MULDREW, D. B., GLADWIN, J. C. et JAMES, H. G. [1978] An F-layer model for North America and its application to the Search and Rescue Satellite Programme. Proc. of the Symposium of the COSPAR Satellite Beacon Group on Beacon Satellite Measurements of Plasmaspheric and Ionospheric Properties, Florence, mai 1978. Coordonateur: Prof. P. F. Checcacci, Instituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche, Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.) Florence (Italie), contribution 42.

NISHIZAKI, R. et NAGAYAMA, M. [1969] Analysis of observational data obtained by Alouette II, V. Comparison of foF2 from two observational methods of top-side sounding and ground-based sounding. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **16**, 227-234.

PHYSICAL RESEARCH LABORATORY, Ahmedabad [1969] Proc. of Third International Symposium on Equatorial Aeronomy, Inde.

PIGGOTT, W. R. [1969] Comment recueillir et employer les données ionosphériques en vue de l'établissement de prévisions et d'autres applications pratiques. *J. des Télécomm.*, **36**, 273-279.

PIGGOTT, W. R. [1970] The use of satellite data for prediction purposes, in ionospheric forecasting. AGARD Conf. Proc. No. 49.

PIGGOTT, W. R. [1975] High latitude supplement to URSI handbook of ionogram interpretation and prediction. World Data Centre A for Solar Terrestrial Physics, Report UAG-50, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction (2e éd.), World Data Centre A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG 23. NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique. Une traduction en espagnol existe à LIARA (Argentine) et une traduction en français au CNET (France).

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction (2e éd.). Révision des chapitres 1 à 4. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Rep. UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.

REINISCH, B. W. et HUANG, X. [1982a] Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, Vol. 17, 837-844.

REINISCH, B. W. et HUANG, X. [1982b] Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 1. Automatic O and X trace identification for topside ionograms. *Radio Sci.*, Vol. 17, 421-434.

RISHBETH, H. et KELLEY, D. M. [1971] Maps of the vertical F-layer drifts caused by horizontal winds at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 539-545.

RUSH, C. M. [1976] Un réseau de stations d'observation de l'ionosphère destiné aux prévisions à court terme de la propagation. *J. des Télécomm.*, **43(8)**, 544-549.

RUSH, C. M., POKEMPNER, M., ANDERSON, D. N., PERRY, J., STEWART, F. G. et REASONER, R. [1984] Maps of foF2 derived from observations and theoretical data, *Radio Sci.*, Vol. 19, 1083-1097.

SAYERS, J. [1970] In situ probes for ionospheric investigation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **32**, 663-691.

SHEIKH, N. M., NESKE, E., RAWER, K. et REBSTOCK, K. [1978] Comparaison des teneurs maximales en électrons de la couche F2 déterminées par des mesures in situ avec les prévisions du CCIR. *J. des Télécomm.*, **45**, 225-227.

SOICHER, H. et GORMAN, F. J. [1984] Faraday rotation observations near solar maximum at midlatitudes, *The Ionospheric Effects Symposium.* Ed. par J.M. Goodman, 213-220.

THUILLIER, G., KING, J. W. et SLATER, A. J. [1976] An explanation of the longitudinal variation of the O^1D (630 nm) tropical nightglow intensity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **38**, 155-158.

WAKAI, N. et MATUURA, N. [1980] Operation and experimental results of the Ionosphere Sounding Satellite-b, *Acta Astronautica*, **7**, 999-1020.

WRIGHT, J. W. [1981] Global real-time ionospheric monitoring. *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems.* Ed. J.M. Goodman. US Govt. Printing Office, Library of Congress, Catalog No. 82-600510.

RAPPORT 726-1

DIFFUSION LATÉRALE ET RÉTRODIFFUSION AU SOL ET DANS L'IONOSPHÈRE

(Programme d'études 25C/6)

(1978-1986)

1. Introduction

On a observé que l'azimut d'arrivée de certaines ondes qui se sont propagées par l'ionosphère diffère parfois notablement de celui du grand cercle. Un grand nombre des signaux qui arrivent en dehors du plan du grand cercle présentent les caractéristiques d'un signal diffusé, avec une période d'évanouissement typique de moins d'une seconde. L'angle d'arrivée de ces signaux diffusés est très variable et, à mesure que le trajet de propagation s'écarte du grand cercle, le champ décroît progressivement jusqu'à un niveau inférieur de 25 à 40 dB à celui de l'onde propagée dans le plan du grand cercle [Goddard, 1939; Feldman, 1939; Dieminger, 1951; Hagg et Rolfe, 1963; Edward et Jansky, 1941; Silberstein et Dickson, 1965].

Une onde radioélectrique propagée par l'ionosphère est partiellement diffusée par les irrégularités du sol ou de la mer et même, jusqu'à un certain point, par celles de l'ionosphère elle-même. Les coefficients de diffusion de la surface de la Terre peuvent différer sensiblement selon la nature de cette surface et selon l'angle de site [Steel, 1964]. Une partie de l'énergie diffusée est renvoyée jusqu'au voisinage de l'émetteur sur le trajet de propagation suivi à l'aller [Villard et Peterson, 1952a; Shearman, 1956; Silberstein, 1954; Peterson, 1957; Kono, 1950; Dieminger, 1951]; en mesurant le retard de l'écho, on peut en déduire la distance oblique de la source de diffusion. En employant une antenne directive tournant lentement autour de la verticale, on peut estimer l'azimut de la région d'où provient l'écho. Une étude approfondie a été publiée à ce sujet par Croft [1972].

2. Diffusion latérale au sol et dans l'ionosphère

On a étudié également le mode de propagation par diffusion latérale en fonction des paramètres suivants: champ créé par des ondes entretenues, azimut et données de sondage sous incidence oblique. Le mode de propagation par diffusion latérale apparaît clairement sur les ionogrammes sous incidence oblique mais il ne peut être identifié exactement que si les données des ionogrammes sont utilisées conjointement avec les valeurs du champ des ondes entretenues.

2.1 *Diffusion latérale au sol*

Les signaux qui dévient du trajet du grand cercle résultent le plus souvent de modes de propagation à bonds multiples où la diffusion latérale est provoquée par des irrégularités de la surface de la Terre. L'affaiblissement de propagation le plus faible se présente dans les directions des intersections des zones de silence autour de l'émetteur et du récepteur en raison de la focalisation à la limite de ces zones. La directivité de l'antenne d'émission influe sur la direction d'où provient le champ reçu le plus intense [Miya et Ueno, 1960]. C'est le mode de propagation par diffusion latérale au sol qui explique la déviation vers le sud des signaux de télévision émis par la BBC et reçus en Amérique du Nord [Hagg et Rolfe, 1963], la déviation vers le sud de signaux en ondes

décamétriques reçus dans les deux sens entre l'Angleterre et le Japon [Wilkins, 1960; Kanaya et Yokoi, 1960a], les grandes déviations angulaires des signaux provenant d'Europe et d'Amérique et reçus au Japon [Miya et Kanaya, 1956; Miya et autres, 1957; Kanaya et Yokoi, 1960b et 1960c], enfin la large gamme des azimuts suivant lesquels les signaux sont reçus sur des trajets courts [Dieminger, 1951]. Plusieurs auteurs estiment que la propagation des signaux hors du grand cercle est due à la diffusion sur des surfaces terrestres; le champ du signal diffusé sur une surface maritime leur semble négligeable par rapport à celui du signal diffusé sur une surface terrestre [Miya et Kanaya, 1955; Miya et autres, 1951]. Toutefois, les observations faites en Amérique du Nord sur 41 MHz et sur 20 MHz ne font apparaître que peu de différence entre les signaux diffusés sur une surface terrestre et sur une surface maritime [Hagg et Rolfe, 1963].

2.2 *Diffusion latérale dans l'ionosphère*

Plusieurs auteurs ont signalé la diffusion latérale dans des zones d'irrégularité de l'ionosphère situées dans la région aurorale. Dans certains cas, la propagation hors du grand cercle a été attribuée à la diffusion directe dans des zones d'irrégularité de l'ionosphère sans réflexion classique sur l'ionosphère [Bates et autres, 1966a]. Dans d'autres cas, elle a été attribuée à des modes de propagation par bonds multiples où les signaux diffusés les plus intenses ont été produits par des irrégularités de l'ionosphère dans des zones de focalisation des ondes [Hagg et Rolfe, 1963]. Sur des liaisons Europe-Afrique australe, on a observé des écarts d'azimut jusqu'à ± 50°. Des mesures supplémentaires de temps de propagation ont montré que ces écarts par rapport au grand cercle sont dus à des défauts d'homogénéité de la couche F au voisinage de l'équateur magnétique terrestre [Röttger, 1973a; Crochet, 1972; Nielson et Crochet, 1974] et dans les régions aurorales [Röttger, 1973b]. Crochet suppose de la diffusion par de faibles irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre, tandis que Röttger suppose que les signaux les plus intenses provenant en dehors du plan du grand cercle sont dus à des réflexions spéculaires par des gradients horizontaux de la densité électronique.

Rice [1973] a montré qu'à un moment donné, le signal correspondant à un mode particulier provient de plusieurs directions et que chaque mode comprend des composantes telles que les trajets des rayons s'écartent du trajet du grand cercle d'un angle qui peut atteindre 9° (ce qui indique que les trajets des rayons ont en réalité des points de réflexion différents).

2.3 *Applications pratiques*

Les modes de propagation par diffusion latérale au sol et dans l'ionosphère peuvent permettre de prolonger la durée pendant laquelle on peut utiliser une fréquence donnée sur le trajet qui suit le grand cercle, ainsi que d'employer des fréquences supérieures à la MUF de référence. En revanche, des liaisons risquent d'être affectées par le brouillage causé par des signaux intenses qui ont subi une forte diffusion latérale. Le mode de propagation par diffusion latérale au sol pourrait permettre de maintenir les communications pendant les perturbations; ce mode ne se rencontre pas souvent dans les régions où l'absorption est anormalement élevée. Des essais de transmission faits aux Etats-Unis ont montré que, en cas de diffusion latérale, aussi bien l'étalement moyen de l'azimut de la direction d'arrivée que la largeur du spectre d'évanouissement sont bien plus grands que dans le cas de la propagation le long du grand cercle [Blair, 1971].

On peut prévoir la direction d'où viendront les signaux qui ont subi une diffusion latérale au sol, grâce aux données relatives aux zones de silence, déduites des prévisions mensuelles de la MUF de référence [Hagg et Rolfe, 1963]. La méthode des deux cercles directeurs, complétée par l'emploi de cartes ionosphériques [Miya et Kanaya, 1955], permet de prévoir la MUF pour le trajet en dehors du grand cercle, ainsi que la direction d'où proviendront les signaux diffusés latéralement par le sol.

Les variations saisonnières des écarts importants par rapport au trajet du grand cercle, observées sur un trajet de l'Atlantique nord, ont été étudiées à l'aide d'émissions de radiodiffusion à ondes décamétriques de Deutsche Welle. Le signal transmis sur le trajet du grand cercle est affaibli par l'absorption ionosphérique en été et par une diminution de la MUF en hiver. Pendant ces périodes, les trajets des rayons sont régulièrement déviés en direction de l'équateur. On a observé des écarts de l'ordre de 50 degrés par rapport à l'azimut réel, avec des signaux dont l'intensité peut être jusqu'à 15 dB supérieure à celle des signaux transmis sur le trajet du grand cercle. Au moment des équinoxes, toutefois, ces derniers sont prédominants [Hortenbach, 1979].

En 1961 et 1962, on a mesuré à Moscou les azimuts d'arrivée de signaux émis par les stations WWV, WSL, MSF et JJY, au moyen d'un radiogoniomètre. Les mesures des signaux émis par WWV et WSL en automne et en hiver, entre 1800 et 0500 UT, ont permis d'établir que les écarts par rapport au trajet du grand cercle:

- varient entre ± 5° dans 14% des cas,
- se situent entre +6° et +25° dans 33% des cas,
- varient de −6° à −100° dans 53% des cas.

3. Rétrodiffusion au sol

Pour déterminer la direction d'un écho dû à la rétrodiffusion, la directivité en azimut combinée des antennes d'émission et de réception doit être suffisante pour permettre de faire la distinction avec les échos provenant d'autres directions. Toutefois, du fait des inclinaisons de l'ionosphère, les erreurs éventuelles sur les données azimutales augmentent avec le nombre de bonds.

Pour pouvoir estimer la distance des sources de rétrodiffusion d'après des enregistrements oscilloscopiques, il est nécessaire de postuler l'existence de modes actifs. Leur identification est plus facile si l'on connaît la directivité verticale combinée des antennes mais, si l'on ne possède pas de données d'observation sous incidence verticale, il faut faire preuve de circonspection dans l'énoncé des conclusions. Cependant, lors d'une certaine expérience, il a été possible, malgré l'absence de données sur la hauteur des couches ionosphériques, de déterminer la distance au sol à l'aide d'une antenne dont le diagramme de rayonnement vertical était séparé en deux lobes distincts: le chevauchement des échos dans ces deux lobes a permis de mettre en évidence le phénomène de focalisation [Ranzi, 1961].

Connaissant la variation de l'angle de site en fonction du temps de propagation de la rétrodiffusion (ces renseignements pouvant être obtenus, par exemple, au moyen d'une antenne à balayage vertical), on peut en déduire les paramètres d'un modèle ionosphérique, y compris la composante longitudinale de l'inclinaison de l'ionosphère dans la direction à laquelle on s'intéresse. Sur la base de ces renseignements, et en mesurant l'angle de site des signaux provenant d'une source particulière de rétrodiffusion, on peut déterminer avec une grande précision la distance de la source [Tveten, 1971].

L'effet de focalisation est caractéristique des échos dus à la région F au voisinage de la distance de saut et il semble que la probabilité d'occurence de cet effet soit maximale pendant les soirs d'hiver et les nuits d'été. L'absence de focalisation permet de mettre en évidence les modes de propagation par Es [Bibl, 1960]. La mesure des angles de site de signaux provenant d'une source de rétrodiffusion par Es permet de mettre en évidence sans ambiguïté ces modes de propagation [Tveten et Hunsucker, 1969]. Une autre méthode d'identification des modes Es consiste à mettre en œuvre des sondeurs à rétrodiffusion avec balayage en azimut: il est possible de suivre facilement le déplacement d'îlots d'ionisation sporadique de la région E et on a montré que ces îlots sont animés d'un mouvement général en direction de l'ouest, au voisinage de la latitude 40° nord [Villard et Peterson, 1952b; Clark, 1956; Harwood, 1961; Egan et Peterson, 1962; Bibl, 1961; Shearman et Harwood, 1960].

Les sondeurs mentionnés ci-dessus enregistrent parfois de légères variations de la distance de l'écho, au voisinage de la zone de silence, lesquelles sont fonction de l'azimut. Ces variations peuvent s'expliquer par l'existence d'une onde unique à grande échelle correspondant à une modification d'ionisation de la région F et qui se propage au-dessus de la station d'observation, à des vitesses de l'ordre de 1000 km/h [Tveten, 1961]. De plus, lorsqu'on utilise des impulsions suffisamment courtes pour le sondage par rétrodiffusion, on observe des irrégularités de l'amplitude du signal qui peuvent varier dans le temps. Il semble que ces augmentations d'intensité du signal soient dues à des irrégularités se déplaçant dans l'ionosphère qui provoquent la focalisation du signal [Tveten, 1961; Shearman, 1963], ou à certaines conditions spéciales [Dueno, 1963]. Georges et Stephenson [1969] ont étudié les effets des perturbations itinérantes dans la région F sur des enregistrements de sondages par rétrodiffusion par simulation numérique; ils ont montré que, dans certains cas, les méthodes classiques pour calculer les vitesses et les directions à partir des enregistrements peuvent conduire à des résultats erronés.

On a souvent observé une absence de corrélation entre l'affaiblissement de transmission sur une liaison donnée et l'affaiblissement total dans les sondages par rétrodiffusion effectués le long du même trajet de propagation. Cela provient de ce que l'intensité des échos rétrodiffusés dépend beaucoup de la présence d'irrégularités de la région F2 qui produisent une focalisation sans avoir d'influence décelable sur l'affaiblissement de transmission d'une liaison radioélectrique. De même, on a souvent observé que cet effet de focalisation est plus intense lorsque le sondage par rétrodiffusion est effectué, à des latitudes tempérées, dans la direction du champ magnétique terrestre. L'amplitude des signaux rétrodiffusés présente une corrélation négative avec l'apparition de F-diffus.

D'autres études portant sur la fréquence 40,3 MHz ont mis en évidence des échos dont la durée de propagation atteignait jusqu'à 50 fois celle des échos dus à des réflexions sur la couche E [Maynard, 1961], il s'agit d'échos auroraux transmis en dehors du trajet du grand cercle ainsi que de réflexions par diffusion au sol avec un ou deux bons sur F2, sur des distances pouvant atteindre 6000 km. En hiver, pendant la journée, il s'agissait presque toujours de réflexion sur F2.

Le spectre Doppler de la rétrodiffusion par la surface des océans se caractérise par deux échos dominants du premier ordre, entourés par un continuum du second ordre. La direction dominante des vagues et, par voie de conséquence, la direction du vent en surface, peuvent être estimées d'après les échos du premier ordre. Pour pouvoir estimer d'autres caractéristiques de l'état de la mer, par exemple, la vitesse du vent et la hauteur des vagues, il faut que le spectre de rétrodiffusion du second ordre ne subisse pas de contamination ionosphérique. Il est possible de vérifier le degré d'élargissement Doppler et les multimodes [Ward, 1985] dans les zones où des îles et des lignes littorales se trouvent dans le champ de vision.

4. Rétrodiffusion dans l'ionosphère

On a observé, expérimentalement, dans l'ionosphère des irrégularités et des gradients capables de produire des échos de rétrodiffusion directe à des fréquences bien supérieures aux fréquences normalement réfléchies par l'ionosphère, dans des conditions d'ionisation supérieure à la normale.

Au voisinage de la zone aurorale, les irrégularités de la densité d'ionisation dans la région E, liées aux perturbations aurorales, peuvent entraîner une diffusion des ondes décamétriques, métriques et même décimétriques. On trouvera dans [Little et autres, 1956; Presnell et autres, 1959; Fricker et autres, 1957; Bagaryatskii, 1961; Unwin et Baggaley, 1972] des études d'ensemble de la question.

L'intensité et la probabilité d'occurence de la rétrodiffusion aurorale sont soumises à des variations diurnes prononcées, avec des crêtes en fin de soirée et au début de la matinée; toutefois l'occurence, en heure locale, de ces crêtes dépend de la latitude magnétique et du niveau des perturbations magnétiques [Unwin, 1967; Greenwald et autres, 1973]. On observe des variations saisonnières qui atteignent leur maximum pendant les périodes d'équinoxe. Des études montrent que la réflexion critique peut se produire à des fréquences aussi élevées que 100 MHz pendant les perturbations aurorales, ce qui justifie l'emploi d'un modèle théorique avec faible diffusion et réflexion critique [Moorcroft, 1961] pour expliquer le mécanisme des échos à ces fréquences. Une expérience faite sur six fréquences (entre 50 et 3000 MHz) a permis à Chesnut [1969] de déduire que le coefficient de diffusion peut être donné approximativement par une fonction exponentielle de fréquence. L'effet Doppler observé sur les signaux de diffusion aurorale pose des problèmes pour les communications. [Czechowsky, 1974; Tsunoda, 1976].

Les irrégularités de l'ionisation aurorale, auxquelles sont dus les échos par rétrodiffusion dans une très large gamme de fréquences, sont liées aux aurores visibles, ainsi qu'aux champs électriques et aux précipitations de particules énergétiques associés aux aurores [Bates et autres, 1966b; Bates et autres, 1969]. Le haut degré de sensibilité manifesté par les irrégularités le long des lignes de force du champ magnétique se traduit par une concentration apparente des échos dans la région E dans le cas des ondes métriques et décimétriques [Unwin, 1958]. Les échos auroraux provenant de l'ionosphère pendant les heures de nuit sont de caractère discret dans l'espace, alors que les échos auroraux provenant de l'ionosphère éclairée par le Soleil sont spatialement diffus [Presnell et autres, 1959].

On a observé une rétrodiffusion directe par des irrégularités de la région F à des altitudes comprises entre 250 et 400 km, qui ne semblent avoir aucun lien avec l'aurore visible [Bates, 1959], les échos diurnes observés en hiver étant plus sporadiques que ceux qui ont été observés pendant la nuit [Bates, 1960]. Aux longueurs d'ondes décamétriques, la réfraction ionosphérique suffit à donner lieu à d'intenses échos provenant de la région F; Bates [1966], se fondant sur des données de rétrodiffusion dans la gamme des ondes décamétriques qui avaient été obtenues au voisinage du pôle géomagnétique, a proposé un système de surveillance de la rétrodiffusion aurorale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAGARYATSKII, B. A. [1961] Radar reflections from aurorae. *Usp. Soviet. Fiz. Nauk*, **73**, 197-241.

BATES, H. F. [1959] The height of irregularities in the arctic atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **64**, 1257-1265.

BATES, H. F. [1960] Direct HF back-scatter from the F-region. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1993-2002.

BATES, H. F. [1966] A proposed polar auroral radar system. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 903-907.

BATES, H. F., ALBEE, P. R. et HUNSUCKER, R. D. [1966a] On the relationship of the aurora to non great-circle high frequency propagation. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1413-1420.

BATES, H. F., BELON, A. E., ROMICK, G. J. et STRINGER, W. J. [1966b] On the correlation of optical and radio auroras. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 439-446.

BATES, H. F., SHARP, R. D., BELON, A E. et BOYD, J. S. [1969] Spatial relationships between HF radar aurora, optical aurora and electron precipitation. *Planet. Space Sci.*, **17**, 83-95.

BIBL, K. [1960] Experimental proof of focusing at the skip distance by back-scatter records. *Proc. IRE*, **48**, 956-957.

BIBL, K. [1961] Neuartige Back-scatter Registrierungen und Ergebnisse (Nouvelles méthodes d'enregistrement de la rétrodiffusion; résultats obtenus), d'après le rapport de la réunion sur la physique de l'ionosphère et de la propagation des ondes *FTZ*. Darmstadt Kleinheubacher Berichte, **8**, 111-114.

BLAIR, J. C. [1971] The effectiveness of spectrum and azimuth spread measurements in detecting side scatter. Proc. 4th Allerton Conference on DF, University of Illinois, Urbana, IL., Etats-Unis d'Amérique.

CHESNUT, W. G. [1969] Low-frequency waves and irregularities in the auroral ionosphere as determined by radar measurements, in *Low Frequency Waves and Irregularities in the Ionosphere*, publié par N. d'Angelo, D. Riedel Pub. Co., Dordrecht, Hollande, 173-191.

CLARK, C. [1956] Motion of sporadic-E patches determined from high-frequency back-scatter records, *Nature*, **178**, 486-487.

CROCHET, M. [1972] Propagation transéquatoriale en dehors du grand cercle en ondes décamétriques. Part I: Mise en évidence et morphologie., *Ann. de Géophys.*, **28**, 27-35. Part II: Application à l'étude par diffusion des irrégularités. *Ann. de Géophys.*, **28**, 381.

CROFT, T. A. [1972] Sky-wave back-scatter: A means for observing our environment at great distances. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **10**, 73-155.

CZECHOWSKY, P. [1974] Doppler shift of auroral back-scatter signals. *J. Geophys. Res.*, **40**, 229-237.

DIEMINGER, W. [1951] The scattering of radio waves. *Proc. Phys. Soc.*, **64-B**, 142-158.

DUENO, B. [1963] Interpretation of some sweep-frequency back-scatter echoes. *J. Geophys. Res.*, **68**, 3603-3610.

EDWARD, C. F. et JANSKY, K. G. [1941] Measurement on the delay and direction of arrival of echoes from nearby short wave transmitters. *Proc. IRE*, **29**, 322.

EGAN, R. D. et PETERSON, A. M. [1962] Back-scatter observations of sporadic-E. *Ionospheric Sporadic E*, 89-109. Ed. Smith, E. K. and Matsushita, S., Pergamon Press.

FELDMAN, C. B. [1939] Deviations of short radio waves from the London-New York great circle path. *Proc. IRE*, **27**, 625.

FRICKER, S. J., INGALLS, R. P., STONE, M. L. et WANG, S. C. [1957] UHF auroral observations. *J. Geophys. Res.*, **62**, 527-546.

GEORGES, T. M. et STEPHENSON, J. J. [1969] HF radar signatures of travelling ionospheric irregularities, 3D ray-tracing simulation. *Radio Sci.*, **4**, 679-699.

GODDARD, D. R. [1939] Transatlantic reception of London television signals. *Proc. IRE*, **27**, 692.

GREENWALD, R. A., ECKLUND, W. L. et BALSLEY, B. B. [1973] Auroral currents, irregularities and luminosity. *J. Geophys. Res.*, **78**, 8193-8204.

HAGG, E. L. et ROLFE, W. [1963] A study of transatlantic radio propagation modes at 41.5 Mcs. *Can. J. Phys.*, **41**, 220.

HARWOOD, J. [1961] Some observations of the occurrence and movement of sporadic-E ionization. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **20**, 243-262.

HORTENBACH, K. J. [1979] Über das jahreszeitliche Verhalten beträchtlicher Grosskreisabweichungen auf Nordatlantikstrecken (Variations saisonnières d'écarts importants par rapport au trajet par l'arc de grand cercle sur des trajets de l'Atlantique Nord). *Kleinheubacher Berichte*, Vol. 22, 327-334.

KANAYA, S. et YOKOI, H. [1960a] Simultaneous measurements of azimuthal arrival angles of signals in cooperation with United Kingdom – Determination of scattering area. *KDD Tech. J.*, **25**, 38-43.

KANAYA, S. et YOKOI, H. [1960b] The lateral deviation of radio waves propagated along the longer great circle path from Europe. *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, **14**, 192-195.

KANAYA, S. et YOKOI, H. [1960c] The bearings of WWV signals, Washington DC, observed at Tokyo. *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, **14**, 435-440.

KONO, T. [1950] Experimental study on scattered echoes (II). *Rep. Ion. Res. Japan*, **4**, 189-199.

LITTLE, C. G., RAYTON, W. M. et ROOF, H. B. [1956] Review of ionospheric effects at VHF and UHF. *Proc. IRE*, **44**, 992-1018.

MAYNARD, L. A. [1961] Propagation of meteor-burst signals during the polar disturbance of November 12-16, 1960. *Can. J. Phys.*, **39**, 628.

MIYA, K., ISHIKAWA, M. et KANAYA, S. [1957] On the bearing of ionospheric radio waves. *Rep. Ion. Res. Japan*, **11**, 130-144.

MIYA, K. et KANAYA, S. [1955] Radio propagation prediction considering scattering wave on the Earth's surface. *Rep. Ion. Res. Japan*, **9**, 1.

MIYA, K. et KANAYA, S. [1956] On the lateral deviation of radio waves coming from Europe. *Rep. Ion. Res. Japan*, **10**, 1-8.

MIYA, K., KOBAYASHI, T. et WAKAI, N. [1951] Field intensity of scattered wave in radio wave propagation. *Rep. Ion. Res. Japan*, **5**, 55.

MIYA, K. et UENO, K. [1960] Influence of directivity of the transmitting antenna on the bearing of HF signals. *Rep. Ion. Res. Japan*, **14**, 187.

MOORCROFT, D. R. [1961] Models of auroral ionization. *Can. J. Phys.*, **39**, 677-715.

NIELSON, D. L. et CROCHET, M. [1974] Ionospheric propagation of HF and VHF radio waves across the geomagnetic equator. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 688-702.

PETERSON, A. M. [1957] Ionospheric back-scatter. *Annals of the IGY III*, Part IV, 361-381. Pergamon Press.

PRESNELL, R. I., LEADABRAND, R. L., PETERSON, A. M., DYCE, R. B., SCHLOBOHM, J. C. et BERG, M. R. [1959] VHF and UHF radar observations of the aurora at College, Alaska. *J. Geophys. Res.*, **64**, 1179-1190.

RANZI, I. [1961] Back-scatter echo pattern and vertical radiation diagram. Centro radioelettrico sperimentale G. Marconi, Rome, Note 8.

RICE, D. W. [1973] Phase characteristics of ionospherically propagated radio waves. *Nature, Physical Science*, **244**, 86-88.

RÖTTGER, J. [1973a] Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35**, 1195-1206.

RÖTTGER, J. [1973b] Seitenscatter durch polares spread-F beobachtet auf der Strecke Lindau-Tsumeb (Diffusion latérale due à des F-diffus polaires, observée sur le trajet Lindau-Tsumeb). *Kleinheubacher Berichte*, **16**, 155-157.

SHEARMAN, E. D. R. [1956] A study of ionospheric propagation by means of ground back-scatter. *Proc. IEE*, **103**, 203-209.

SHEARMAN, E. D. R. [1963] The amplitude and spectrum of ground back-scatter echoes. *Proc. International Conference on the Ionosphere* 1962, 293-300. Ed. A. C. Stickland, Bartholomew Press.

SHEARMAN, E. D. R. et HARWOOD, J. [1960] Sporadic-E observed by back-scatter techniques in the United-Kingdom. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **18**, 29-42.

SILBERSTEIN, R. [1954] Sweep-frequency back-scatter – Some observations and deductions. *Trans. IRE*, AP-2, 56-63.

SILBERSTEIN, R. et DICKSON, F. H. [1965] Great circle and deviated path observations on CW signals using a simple technique. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-13, 52-63.

STEEL, J. G. [1964] The effect of the ground back-scatter coefficient on observations of sporadic-E over sea, land and mountains. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 323-324.

TSUNODA, R. T. [1976] Doppler velocity maps of the diffuse radar aurora. *J. Geophys. Res.*, **81**, 425-435.

TVETEN, L. H. [1961] Ionospheric motions observed with high-frequency back-scatter sounders. *NBS J. Res.*, **65-D**, 115-127.

TVETEN, L. H. [1971] Range estimation based on back-scatter measurements. Proc. of 4th Allerton-House Conference on HF Radio Direction Finding and Radio Location Research, RRL Publication No. 389, University of Illinois, Urbana, IL, Etats-Unis d'Amérique.

TVETEN, L. H. et HUNSUCKER, R. D. [1969] Remote sensing of the terrestrial environment with an HF radio high-resolution azimuth and elevation scan system. *Proc. IEEE*, **57**, 487-493.

UNWIN, R. S. [1958] The geometry of auroral ionization. *J. Geophys. Res.*, **63**, 501-506.

UNWIN, R. S. [1967] The morphology of the radio aurora at sunspot maximum: I Diurnal and seasonal variations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 1167-1181.

UNWIN, R. S. et BAGGALEY, W. J. [1972] The radio aurora. *Ann. de Géophys.*, **28**, 111-127.

VILLARD, O. G. et PETERSON, A. M. [1952a] Scatter-sounding: a technique for study of the ionosphere at a distance. *Trans. IRE*, PGAP-3, 186-201.

VILLARD, O. G. et PETERSON, A. M. [1952b] A method for studying sporadic-E clouds at a distance. *Proc. IRE*, **40**, 992-994.

WARD, B. D. [1985] Doppler characteristics of HF back-scatter – the Jindalee mini-radar. Proc. URSI-IPS Conference on the Ionosphere and Radio-wave Propagation. Eds D. G. Cole and L. F. McNamara. IPS Radio and Space Services Tech. Rep. TR-85-04, Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

WILKINS, A. F. [1960] HF propagation – its present and future use for communications purposes. *J. Brit. Inst. Radio Engrs.*, **20**, 939.

RAPPORT 250-6

PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE A GRANDE DISTANCE SANS RÉFLEXIONS INTERMÉDIAIRES SUR LE SOL

(Programme d'études 25D/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Il existe des modes de propagation par les régions ionosphériques normales, dans lesquels les ondes décamétriques et métriques peuvent parcourir de grandes distances, dans l'ionosphère ou en dessous, en suivant des trajets à faible absorption ne comportant aucune réflexion intermédiaire sur le sol. Ces distances varient de la distance limite que peut parcourir en un seul bond le rayon classique émis sous un petit angle, jusqu'à la distance du trajet autour de la Terre. Parmi les modes de propagation actuellement reconnus, il convient de citer: la propagation normale à un seul bond par des rayons émis sous de grands angles, généralement appelés rayons de Pedersen; la propagation favorisée par l'inclinaison des couches ionosphériques selon des modes sans retour au sol, parfois appelée propagation selon une corde; et la propagation guidée dans l'ionosphère selon des modes ordinairement appelés mode par «galerie des chuchotements» («whispering gallery») et «mode à deux parois».

En plus de la propagation à grande distance par les régions ionosphériques normales, la propagation des ondes hectométriques et décamétriques peut résulter d'un guidage par des irrégularités ionosphériques alignées le long des lignes de force du champ magnétique au-dessus du maximum d'ionisation de la région F.

2. Propagation suivant le rayon de Pedersen

Dans les prévisions ionosphériques concernant des circuits de plus de 4000 km, on ne tient généralement pas compte de la propagation à un seul bond. Toutefois, celle-ci peut se produire sur des distances supérieures à 10 000 km [Fulton et autres, 1960]. Il ressort des données expérimentales présentées par Muldrew et Maliphant [1962] que:

- la propagation à un seul bond suivant le rayon de Pedersen se produit fréquemment jusqu'à 5600 km, l'été pendant la journée;
- la gamme des fréquences utiles pour les radiocommunications peut être étendue de plusieurs MHz;
- en théorie, pour les fréquences inférieures à la fréquence maximale qui peut être réfléchie, la limite supérieure de la distance de propagation à un seul bond suivant le rayon de Pedersen est fixée par le rapport signal/bruit et la portée de ce mode de propagation peut facilement dépasser 7500 km dans les régions tempérées et 10 000 km dans les régions équatoriales.

Selon Sajine et Tinin [1975], la diffusion au niveau du maximum d'ionisation d'une couche peut créer des conditions favorables à la propagation à grande distance suivant le rayon de Pedersen. L'affaiblissement de l'onde associé au rayon de Pedersen décroît à mesure qu'augmente l'uniformité des valeurs extrêmes de la densité électronique $N(Z)$. La présence de plusieurs types d'hétérogénéités et de plusieurs couches accroît l'uniformité des valeurs extrêmes de $N(Z)$. La convergence des fréquences critiques et des hauteurs des maximums d'ionisation des différentes couches en est un exemple. Une telle situation prédomine le plus souvent en été pendant les heures de jour.

3. Propagation favorisée par l'inclinaison des couches de l'ionosphère

Les ondes décamétriques peuvent se propager à grande distance selon des modes favorisés par l'inclinaison longitudinale des couches de l'ionosphère. Ces inclinaisons peuvent résulter:

- de variations de la hauteur des couches ou
- de variations de la fréquence critique des couches.

L'inclinaison d'une couche ionosphérique peut provoquer, par réfraction, soit le retour d'un rayon vers la Terre, soit sa propagation au-dessus de la surface terrestre avant qu'il ne pénètre à nouveau dans l'ionosphère et subisse une nouvelle réfraction qui le ramènera vers le sol. Titheridge [1958] a établi une relation générale qui peut servir à calculer les écarts d'azimut et d'angle de site dus à un rayon qui rencontre des formes de couches stratifiées particulières ayant des inclinaisons différentes. Folkestad [1968] a établi un jeu de formules qui donnent des expressions exactes pour les trajets de groupe et les distances au sol par rapport aux points d'impact des rayons propagés dans une ionosphère excentrique par rapport à la Terre. Rao [1968a, 1968b, 1968c] s'est servi d'un programme informatique de trajectographie à trois dimensions pour calculer la direction d'arrivée à prévoir et les modifications d'azimut des ondes radioélectriques résultant des variations temporelles de la distribution de la densité électronique et des variations saisonnières des inclinaisons au lever du Soleil. Ce type de propagation a été souvent observé sur des trajets transéquatoriaux à grande distance [Stein, 1958; Southworth, 1960; Kerblaï et Kovalevskaïa, 1967; Gerson, 1968; Tao et autres, 1970].

Les observations de signaux en ondes décamétriques se propageant jusqu'au point situé à l'antipode de l'émetteur [Bold, 1969; Albrecht, 1957, 1959] ont démontré l'importance du mode de propagation par bond selon une corde, favorisée par l'inclinaison longitudinale des couches de l'ionosphère. Bold [1972] a observé, sur un trajet entre deux points antipodaux, une brusque et forte augmentation du champ avant le lever du Soleil; celle-ci n'avait pas été prévue avec un précédent modèle informatique qui avait donné des résultats satisfaisants pour le même trajet, mais sur une fréquence inférieure. Fenwick et Villard [1963] se sont référés à ce type de propagation pour expliquer les mesures des échos tour-du-monde (RTW) qui, dans certaines conditions, présentaient très peu de dispersion et d'affaiblissement entre échos successifs. L'analyse de ces observations a montré que, sur un grand nombre de trajets dans l'hémisphère non éclairé, les échos RTW consistaient en réflexions successives sur l'ionosphère mais que dans l'hémisphère éclairé les ondes étaient le plus souvent renvoyées au sol par réfraction.

Hortenbach et Rogler [1979] ont observé sur un trajet passant par les antipodes (de Wertachtal, en République fédérale d'Allemagne, à Melbourne, en Australie) des intensités de signaux exceptionnellement élevées résultant de modes de propagation favorisée par l'inclinaison des couches de l'ionosphère. Le couplage des ondes entrant et sortant du conduit se produisait manifestement par l'intermédiaire des couches inclinées dans les régions crépusculaires au voisinage des deux points terminaux du trajet.

4. Propagation guidée dans l'ionosphère

On a attribué certains modes de propagation à la canalisation dans l'ionosphère, servant en l'occurrence de guide d'ondes, plutôt qu'à la simple propagation de l'onde ionosphérique par un trajet à plusieurs bonds. Ces modes se rencontrent dans le cas:

- d'un profil de la densité électronique caractérisé par une augmentation progressive de la densité électronique avec la hauteur. Le guide d'ondes a une limite supérieure, généralement dans la couche F, mais pas de limite inférieure. Les ondes guidées se propagent à l'intérieur de la concavité de la sphère réfléchissante; la basse ionosphère se comporte comme un trajet de «galerie des chuchotements» sphérique (cas limite de la propagation selon une corde) pour les ondes radioélectriques;
- d'un profil de la densité électronique caractérisé par des minima relatifs, comme celui qui existe entre les couches E et F. Le guide d'ondes possède une paroi supérieure et une paroi inférieure, et le guidage s'effectue dans l'espace situé entre les deux sphères concentriques (guide à deux parois). L'observation ne permet pas de faire la distinction entre le mécanisme de propagation par la «galerie des chuchotements» et par les guides à deux parois; on trouve plus souvent un profil de densité électronique du type «galerie des chuchotements» que le profil nécessaire aux guides à deux parois.

Une méthode qui permet d'estimer la fréquence maximale du guide, compte tenu de la hauteur de la couche F2, de la densité électronique maximale et du gradient, a été mise au point par Chlionsky [1979; 1980].

4.1 *Optique géométrique de la propagation guidée dans l'ionosphère*

Il faut bien faire la distinction entre les modes de propagation guidée dans l'ionosphère et les autres mécanismes, comme le mode de la propagation à plusieurs bonds; on a ainsi été amené à appliquer l'analyse géométrique (tracé des rayons) uniquement aux fréquences voisines de la MUF de référence ou supérieures à cette MUF pour la propagation à plusieurs bonds. L'analyse de ce phénomène par la méthode du tracé des rayons a été réalisée avec des modèles ionosphériques qui tenaient compte des effets suivants: asymétrie sphérique, passages du jour à la nuit, irrégularités et discontinuités [Barker et Grossi, 1966; Grossi et Langworthy, 1966, 1968; Chvojková, 1965, 1974a, 1974b, 1976; Tsedilina, 1975].

Il ressort de l'analyse que:

4.1.1 la propagation par la «galerie des chuchotements» est possible dans n'importe quelle phase du cycle solaire;

4.1.2 à la fréquence la plus favorable, un rayon doit former un angle de 7 à 8° au maximum avec la tangente à la couche pour que le guidage se produise; un rayon partant d'une source située au sol, voire même rasant l'horizon, arrive aux altitudes ionosphériques avec un angle d'incidence trop petit ou un angle rasant trop grand pour que le guidage se produise;

4.1.3 il est impossible d'atteindre depuis le sol les trajets guidés sauf si des centres de diffusion ou de réfraction (ou de réflexion) introduisent un effet de couplage des ondes entre le sol et la «galerie des chuchotements»;

4.1.4 la MUF dans la «galerie des chuchotements» est environ le double de la MUF de référence d'un trajet équivalent à plusieurs bonds, entre les stations au sol;

4.1.5 il peut y avoir coexistence de la propagation à plusieurs bonds et de la propagation par la «galerie des chuchotements» à la fois sur la face éclairée et sur la face non éclairée de la Terre; et

4.1.6 tous les affaiblissements calculés, y compris l'affaiblissement par absorption, dépendent assez peu de la séparation géographique des stations; ils sont de l'ordre de 125 à 138 dB entre 25 et 45 MHz.

4.2 *Analyse du «champ complet» de la propagation guidée dans l'ionosphère*

En se fondant sur la théorie du «champ complet», on a pu expliquer de nombreuses caractéristiques de la propagation des échos «tour-du-monde» et des signaux émis par satellite au-dessous de l'horizon [Chang, 1971a, 1971b]. Les calculs théoriques montrent que:

4.2.1 la MUF pour une propagation par la «galerie des chuchotements» de la couche F est égale à environ 6 fois la fréquence en incidence verticale;

4.2.2 à mesure que le rapport de la fréquence de l'onde à la fréquence de pénétration verticale augmente au-dessus de 6, il y a déperdition d'énergie et l'affaiblissement augmente;

4.2.3 si on admet que pendant le jour la région F a une fréquence de plasma maximale de 9 MHz, la déperdition est suffisante pour qu'un signal faisant le tour de la Terre subisse un affaiblissement d'environ 11 dB;

4.2.4 étant donné que la fréquence maximale de pénétration sous incidence oblique de la région F est environ 4 fois plus grande que la fréquence de pénétration verticale, la MUF pour la propagation par la «galerie des chuchotements» de la couche F est supérieure à 1,5 fois la MUF pour les communications sol-sol;

4.2.5 si l'émetteur et le récepteur sont placés là où le mode le moins affaibli donne le champ le plus élevé, la «galerie des chuchotements» de la couche F donne, à une distance de 11 000 km de l'émetteur, un champ supérieur d'environ 3 à 4 dB au champ en espace libre;

4.2.6 la MUF pour la propagation par la «galerie des chuchotements» de la couche E est égale à 14,9 fois la fréquence de pénétration verticale;

4.2.7 en ce qui concerne la région E pendant le jour, la MUF pour la propagation par la «galerie des chuchotements» dépasse de plus de 2,6 fois la MUF pour les communications sol-sol;

4.2.8 les collisions entre électrons entraînent un affaiblissement important des modes de propagation piégés par les «galeries des chuchotements» de la région E; à la différence des communications qui s'effectuent par la «galerie des chuchotements» de la région F, la communication n'est alors possible que pour une distance de quelques milliers de kilomètres mais elle est inefficace pour la propagation autour du monde.

Le champ des modes de propagation guidée dans l'ionosphère a été estimé par Vsekhsvyatskaya et Kalinine [1979] et l'application de la méthode invariante adiabatique à l'étude des modes de propagation guidée a été mise au point par Gourevitch et Tsedilina [1979, 1985].

4.3 *Couplage des ondes dans les modes de propagation guidée dans l'ionosphère*

Les mécanismes naturels pouvant réaliser une injection (ou une extraction) des ondes décamétriques dans (ou depuis) les modes de propagation guidée dans l'ionosphère sont les suivants:

- l'inclinaison des couches ionosphériques,
- l'ionisation sporadique de la région E,
- les colonnes et les rideaux auroraux,
- les traînées météoriques, et
- les creux d'ionisation de la région F équatoriale.

On peut aussi envisager des centres de diffusion artificielle, tels que des traînées éjectées par une fusée, un ensemencement ionosphérique à partir d'une fusée ou un nuage ionisé provoqué par des ondes radioélectriques. Les caractéristiques fondamentales du coupleur d'ondes sont les suivantes:

- affaiblissement d'injection ou d'extraction,
- étalement du temps et étalement Doppler,
- géométrie de l'utilisation, et
- durée utile des mécanismes géophysiques.

Les affaiblissements d'injection ou d'extraction imputables à l'inclinaison des couches ionosphériques sont beaucoup plus faibles que pour les autres coupleurs. Barker et Grossi [1966] illustrent la transformation d'un mode de propagation à plusieurs bonds en un mode par «galerie des chuchotements» lors du passage du jour à la nuit; c'est grâce au manque de symétrie que de tels trajets guidés peuvent être excités à partir du sol.

Les propriétés globales des conduits ionosphériques ont été étudiées [Touchentsova et autres, 1975]. Toman et Miller [1977] ont montré que, dans le cas du guidage ionosphérique des rayons en ondes décamétriques, la présence constante d'un creux d'ionisation dans le plan de la trajectoire du rayon n'est pas nécessaire au guidage mais qu'elle le facilite. Burtnyk et autres [1962] ont observé que les inclinaisons de la couche F au coucher du Soleil durent plus longtemps, ont une amplitude maximale plus grande et sont plus fréquentes que les inclinaisons au lever du Soleil. Gerson et autres [1969] ont relevé un déclin de la réception antipodale avant le lever du Soleil et un renforcement de la réception antipodale après le lever du Soleil.

Des sondages ionosphériques à partir d'un satellite ont montré l'existence d'importants feuillets d'irrégularités d'ionisation au-dessus de l'altitude du maximum de densité électronique de la région F. Ces feuillets s'étendent probablement au-dessous de cette altitude et il est possible qu'ils soient à l'origine de la propagation à grande distance sur des fréquences supérieures à la MUF de référence [Hagg et Rolfe, 1963].

Gourevitch et Tsedilina [1975] ont étudié le piégeage de l'énergie, le conduit formé entre les couches de l'ionosphère et la déperdition de l'énergie pendant la diffusion spéculaire des ondes radioélectriques par des irrégularités dues à l'échauffement de l'ionosphère.

4.4 *Expériences avec des satellites*

Dans l'expérience satellite à satellite OV4 [Barker et Grossi, 1970], la déperdition d'énergie des ondes guidées jusqu'à la surface de la Terre et la réception à bord d'un aéronef volant à haute altitude étaient rares sauf dans les cas suivants: visibilité directe, réception aux antipodes, lever et coucher du Soleil. Les résultats indiquent également que:

- le gradient horizontal de la densité électronique au voisinage des régions de lever et de coucher du Soleil peut produire les inclinaisons nécessaires à la transformation de la propagation à plusieurs bonds dans l'hémisphère éclairé en propagation par «galerie des chuchotements» dans un guide à grande altitude dans l'hémisphère non éclairé; et

- une «galerie des chuchotements» orientée nord-sud près du cercle crépusculaire pourrait être très efficace pour les communications à grande distance entre des points à grande altitude.

Beni et autres [1978] ont étudié la réception au sol de signaux en ondes décamétriques émis par un satellite sur orbite au-dessus de la région F2 de l'ionosphère, ces signaux ayant parcouru de grandes distances s'étendant au-delà de l'horizon. Des signaux provenant du satellite 1970-34A ont été reçus à Florence (Italie) après avoir parcouru plus de 10 000 km. On a observé une grande probabilité de propagation à partir de la zone de l'Atlantique nord quand le satellite était au-dessus du maximum de la couche F2 (altitude: 445-1500 km) et quand la région du coucher du Soleil était proche de la station de réception. Une autre situation favorable s'est produite quand le satellite se trouvait à une grande altitude (800-1600 km) dans la zone de nuit au sud de la station de réception; le satellite et la station de réception se trouvaient alors tous deux le long de la zone crépusculaire. Les affaiblissements de transmission en espace libre ont été réduits d'une valeur allant jusqu'à 6 dB sur les distances de 12 000 km et jusqu'à 8 dB pour presque tous les passages du satellite aux antipodes. Cela tend à confirmer l'existence de la propagation guidée et son importance pour les communications à grande distance entre les satellites et les stations terminales au sol.

5. Propagation des ondes décamétriques guidée par l'ionisation alignée le long des lignes de force du champ magnétique

5.1 *Existence d'une propagation des ondes décamétriques guidée par l'ionisation alignée suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre*

L'existence d'une propagation des ondes décamétriques par des irrégularités d'ionisation alignées suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre a été suggérée presque en même temps par Wagner [1928] et par Pedersen [1929]. Par la suite, Obayashi [1959] puis Gallet et Utlaut [1961] ont interprété de la même façon des résultats d'observation sur des échos à temps de propagation élevé, par radiodétection en ondes décamétriques. Des observations ultérieures faites par radiodétection en ondes décamétriques ont paru confirmer cette interprétation [du Castel, 1963, 1965a; Petit, 1966], tandis que d'autres observations ont paru la contredire [Budden et Yates, 1952; Thomas et autres, 1963]. Une étude spéciale, effectuée dans la région magnétiquement conjuguée à la surface de la Terre, a montré la possibilité de la propagation alignée suivant les lignes de force du champ dans une large gamme de fréquences, dans la bande des ondes décamétriques [Boukine, 1978, 1981]. Une analyse de la propagation des ondes décamétriques guidée dans l'ionosphère est donnée par Toman [1979]. Un type d'écho à temps de propagation élevé (fréquence $\leqslant$ 4 MHz, temps de propagation $\leqslant$ 0,4 s) peut être expliqué par une propagation guidée suivant les lignes de force du champ [Muldrew, 1979; Villard et autres, 1980].

Au cours de la mise au point des techniques spatiales, des résultats d'observations fournis par des fusées ont aussi été interprétés en terme de propagation par guidage [Knecht et Russel, 1962]. Par la suite, des observations faites avec des satellites ont apporté des confirmations supplémentaires [Muldrew, 1963; Calvert et Schmid, 1964; du Castel, 1965b; Dyson, 1967; Loftus et autres, 1966; Ramasastry et Walsh, 1969].

5.2 *Analyse et interprétation des résultats d'observations*

La théorie de la propagation due à des irrégularités alignées suivant les lignes de force du champ magnétique a été développée par plusieurs auteurs [Voge, 1961, 1962; Booker, 1962; Muldrew, 1963; du Castel, 1965c; Walker, 1966]. Dans les irrégularités, l'excès de la densité électronique est égale à quelques centièmes de la densité d'ionisation ambiante; la dimension perpendiculaire au champ magnétique est de quelques kilomètres [Loftus et autres, 1966].

On trouve un maximum de la fréquence d'apparition de ces irrégularités observées par radar vers le lever du Soleil et un maximum secondaire vers le coucher du Soleil [Loftus et autres, 1966; Muldrew, 1967; Petit, 1966; du Castel, 1965c]. Les premières études, qui utilisaient des résultats géographiquement dispersés, montrent que l'apparition du phénomène de guidage semble être indépendante du niveau de perturbation géomagnétique [Muldrew, 1967; Loftus et autres, 1966]. Cependant, une corrélation a été trouvée dans le cas de latitudes moyennes nord (entre 45 et 55° environ de latitude invariante) et pour une activité solaire moyenne [Nishizaki et Matuura, 1972].

Une analyse de données recueillies par satellite, à partir de signaux émis par cinq stations de télémesure situées à basse latitude, montre que l'apparition du phénomène de guidage varie cycliquement avec une période d'une demi-lunaison, avec un maximum vers le 6^{e} et le 21^{e} jour après une nouvelle lune [Sharma et Muldrew, 1973].

Une autre analyse faite sur les données recueillies par satellites (Alouette-2, ISIS-1, ISIS-2) et enregistrées par neuf stations de télémesure situées à des longitudes et des latitudes diverses (dans la zone occidentale comprise entre 58° O et 82° O; dans la zone orientale comprise entre 104° E et 149° E et dans des zones intermédiaires: entre 01° O et 28° E, et à 160° O) [Sharma et Muldrew, 1975], montre que:

- d'après la moyenne établie sur toutes les longitudes, la fréquence minimale d'apparition des échos est d'environ 2% vers mars et septembre, et la fréquence maximale d'occurrence de 7,8% en décembre-janvier et 6,2% en juillet;
- il n'existe qu'un maximum au voisinage du solstice de décembre pour la zone occidentale et un seul maximum au voisinage du solstice de juin pour la zone orientale, tandis que les stations de la zone intermédiaire accusent une variation saisonnière très semblable au tableau général fourni par l'ensemble des données, c'est-à-dire que la fréquence minimale d'occurence se produit pendant les mois d'équinoxes et la fréquence maximale d'occurrence pendant les mois de solstice.

Dans l'analyse précédente on a observé que les guidages se produisaient principalement pour des fréquences comprises entre 1 et 2 MHz et jamais au-dessus de 7 MHz.

Les conduits se forment après le coucher du Soleil et avant la formation de la vallée E-F. Les irrégularités de la région E formées par les courants alignés suivant les lignes de force du champ produisent des champs électriques perpendiculaires, ce qui entraîne l'échange de tubes à flux magnétiques [Cole, 1971; Muldrew, 1980].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBRECHT, H. J. [1957] Investigations on Great Circle Propagation between Eastern Australia and Western Europe. *Geof. Pura e Applicata*, **38**, 169-180.

ALBRECHT, H. J. [1959] Further studies on the chordal-hop theory of ionospheric long range propagation. *Arch. Met. Geoph. Bioklim.* **11**, 383-391.

BARKER, J. I. et GROSSI, M. D. [1966] Design of a satellite-to-satellite communication experiment to explore HF/VHF guided propagation in the lower ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 1, 1229-1234.

BARKER, J. I. et GROSSI, M. D. [1970] Results of the 0V4-1 dual satellite experiment on guided ionospheric propagation. *Radio Sci.*, Vol. 5, 983-996.

BENI, P., BERTINI, F. et PELLIGRINI, P. F. [1978] HF transionospheric long range propagation from satellite observed at Florence. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 26, 37-49.

BOLD, G. E. J. [1969] Power distribution near the antipode of a short-wave transmitter. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 31, 1391-1411.

BOLD, G. E. J. [1972] The influence of chordal paths on signals propagating to the near antipode of an HF radio transmitter. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-20, 741-746.

BOOKER, H. G. [1962] Guidance of radio and hydromagnetic waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, **11**, 4135-4162.

BOUKINE, G. V. [1978] Eksperimentalnye issledovania magnitosfernoyo rasprostranenia KV signalov na trasse zemlia-zemlia (Etudes expérimentales de la propagation magnétosphérique des signaux à ondes décamétriques sur un trajet Terre-Terre). *Géomag. i aeronom.*, Vol. 18, **3**, 440.

BOUKINE, G. V. [1981] Magnitosferny signal v prisoutsvii nagreva ionosfery (Signal magnétosphérique en présence d'un échauffement de l'ionosphère). *Geomag. i aeronom.*, Vol. 21, **3**, 561.

BUDDEN, K. G. et YATES, G. G. [1952] A search for radio echoes of long delay. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **2**, 272-281.

BURTNYK, N., McLEISCH, C. W. et WOLFE, J. [1962] Ionospheric layer tilts at Ottawa, Canada. *Can. J. Phys.*, **40**, 1614-1619.

CALVERT, W. et SCHMID, C. W. [1964] Spread F observations by the Alouette topside sounder satellite. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, 1839-1852.

CHANG, H. [1971a] The waveguide mode theory of whispering-gallery propagation in the F-region of the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 6, 475-482.

CHANG, H. [1971b] Whispering-gallery propagation in the E-region of the ionosphere at HF and VHF. *Radio Sci.*, Vol. 6, 465-473.

CHLIONSKY, A. G. [1979] *Dalnee rasprostanenie radiovoln v ionosfere* (Propagation à grande distance des ondes radioélectriques dans l'ionosphère). Nauka Publishing House, Moscou, URSS.

CHLIONSKY, A. G. [1980] Prediction of waweguide propagation of radio waves using the extremalparametric method based on predicted ionospheric parameters. *Solar-Terrestrial Predictions Proc.*, Vol. IV, D-3, 60-70. Boulder, CO., Etats-Unis d'Amérique.

CHVOJKOVÁ, E. [1965] Analytical formulae for radio path in the spherically stratified ionosphere. *NBS. J. Res*, Vol. 69D, 453-457.

CHVOJKOVÁ, E. [1974a] Radio-path formula: 1-theory, circumterrestrial echo and other singularities. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 14, 57-66 (en russe); 46-53 (en anglais).

CHVOJKOVÁ, E. [1974b] Radio-path formula: 2 practical applications. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 14, 466-494 (en russe); 392-399 (en anglais).

CHVOJKOVÁ, E. [1976] Multiple propagation paths between satellites situated in the ionosphere below the F-layer peak. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 38, 329-331.

COLE, K. D. [1971] Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 33, 741-750.

DU CASTEL, F. [1963] Recherche expérimentale sur le guidage géomagnétique d'ondes décamétriques. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 18, **9-10**, 177-184.

DU CASTEL, F. [1965a] Mise en évidence expérimentale d'un guidage géomagnétique d'ondes décamétriques. *C. R. Acad. Sci.* (Paris), Vol. 261, 1057-1060.

DU CASTEL, F. [1965b] Sur certains échos guidés observés par sondages ionosphériques en satellite. *Space Res. V*, **216**, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, Pays-Bas.

DU CASTEL, F. [1965c] Projet d'observation par satellite des irrégularités d'ionisation alignées sur le champ magnétique dans la magnétosphère. *Planet. and Space. Sci.*, Vol. 13, 1255-1271.

DYSON, P. L. [1967] Magnetic field aligned irregularities at mid geomagnetic latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 28, 857-869.

FENWICK, R. B. et VILLARD, Jr. O. G. [1963] A test of the importance of ionosphere – ionosphere reflections in long distance and around-the-world high-frequency propagation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 5659-5666.

FOLKESTAD, K. [1968] Exact ray computations in a tilted ionosphere with no magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 3, 81-84.

FULTON, B., SANDOZ, O. et WARREN, E. [1960] The lower frequency limits for F-layer radio propagation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 65, 177-183.

GALLET, R. M. et UTLAUT, W. F. [1961] Evidence of the laminar nature of the exosphere obtained by means of guided high frequency wave propagation. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 591-594.

GERSON, N. C. [1968] Ray tracing over a trans-equatorial path. Scatter propagation of radio waves. AGARD Conf. Proc. No. 37 (OTAN, Neuilly-sur-Seine).

GERSON, N. C., HENGEN, J. G., PIPP, R. M. et WEBSTER, J. B. [1969] Radio wave propagation to the antipode. *Can. J. Phys.*, 2143-2159.

GOUREVITCH, A. G. et TSEDILINA, E. E. [1975] Trapping of radiation in the ionospheric duct during scattering on artificial inhomogeneities. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 15, 713-715.

GOUREVITCH, A. G. et TSEDILINA, E. E. [1979] *Sverkhdalnee rasprostranenie korotkikh radiovoln*, (Propagation des ondes décamétriques sur de très grandes distances), Nauka Publishing House, 246, Moscou, URSS.

GOUREVITCH, A. G. et TSEDILINA, E. E. [1985] *Propagation des ondes décamétriques sur de. grandes distances*, Springer, Heidelberg, République fédérale d'Allemagne.

GROSSI, M. D. et LANGWORTHY, B. M. [1966] Geometric optics investigation of HF and VHF guided propagation in the ionospheric whispering-gallery. *Radio Sci.*, Vol. 1, 877-886.

GROSSI, M. D. et LANGWORTHY, B. M. [1968] Short-wave ionospheric whispering-gallery. IEEE International Convention Digest, 88, 18-21 Mars, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

HAGG, E. L. et ROLFE, W. [1963] Study of transatlantic radio propagation modes at 41.5 Mc/s, *Can. J. Phys.*, **41**, 220-223.

HORTENBACH, K. J. et ROGLER, F. [1979] Propagation à très grande distance des ondes courtes; précisions et observations. *J. des Télécomm.*, Vol. 46, 320-329.

KERBLAÏ, T. et KOVALEVSKAYA, E. [1967] Computation of the MUF in the presence of horizontal ionospheric inhomogeneity. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 7, 92-96.

KNECHT, R. W. et RUSSEL, S. [1962] Pulsed radio soundings of the topside ionosphere in the presence of spread F. *J. Geophys. Res.*,Vol. 67, 1178-1182.

LOFTUS, B. T., VAN ZANDT, T. E. et CALVERT, W. [1966] Observations of conjugate ducting by the fixed frequency topside sounder satellite. *Ann. de Geophys.*, Vol. 22, 530.

MULDREW, D. B. [1963] Radio propagation along magnetic field aligned sheets of ionization observed by the Alouette topside sounder. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 5355-5370.

MULDREW, D. B. [1967] Medium frequency conjugate echoes observed on topside-sounder data. *Can. J. Phys.*, **45**, 3935-3944.

MULDREW, D. B. [1979] Generation of long-delay echoes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 5199-5215.

MULDREW, D. B. [1980] The formation of ducts and spread F and the initiation of bubbles by field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, 613-625.

MULDREW, D. B. et MALIPHANT, R. G. [1962] Long-distance one-hop ionospheric radio propagation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 1805-1815.

NISHIZAKI, R. et MATUURA, N. [1972] Conjugate ducted echoes observed on Alouette 2 ionograms. *J. Radio Res. Labs.*, (Japon), **19**, 99.

OBAYASHI, T. [1959] A possibility of the long distance HF propagation along the exospheric field aligned ionization. *Rep. Ion. Res. Japan*, **13**, 177.

PEDERSEN, P. O. [1929] Wireless echoes of long delay. *Proc. IRE*, Vol. 17, 1750-1785.

PETIT, M. [1966] Etude du guidage géomagnétique d'ondes décamétriques entre points conjugués au sol. Diplôme E.S., Fac. des Sc., Paris.

RAMASASTRY, J. et WALSH, E. J. [1969] Conjugate echoes observed by Alouette 2 topside sounder at the longitudes of Singapore. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 5665-5674.

RAO, N. N. [1968a] Ray-tracing investigation of direction of arrival observation of HF radio waves. *Radio Sci.*, Vol. 3, 796-802.

RAO, N. N. [1968b] Bearing deviation in HF transionospheric propagation. I. Exact computations for some ionospheric models with no magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 3, 1113-1118.

RAO, N. N. [1968c] Bearing deviation in HF transionospheric propagation. II. Application of exact computations. *Radio Sci*, Vol. 3, 1119-1123.

SAJINE, V. I. et TININ, M. V. [1975] Long-distance propagation by means of the Pedersen-ray. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 15, 564-567.

SHARMA, R. P. et MULDREW, D. B. [1973] A lunar effect in the occurrence of conjugate echoes on topside sounder ionograms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 8251-8260.

SHARMA, R. P., MULDREW, D. B. [1975] Seasonal and longitudinal variations in the occurrence frequency of magnetospheric ionization ducts. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 977-984.

SOUTHWORTH, M. P. [1960] Night-time equatorial propagation at 50 MHz: First results from an IGY amateur observing programme. *J. Geophys. Res.*, Vol. 65, 601-607.

STEIN, S. [1958] The role of ionospheric layer tilts in long-range high frequency radio propagation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 63, 217-241.

TAO, K., OCHI, F., YAMAOKA, M., WATANABE, S., WATANABE, C. et TANOHATA, K. [1970] Experimental results of VHF transequatorial propagation, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **17**, 83-101.

THOMAS, J. A., McINNES, B. A. et CROUCHLEY, J. [1963] High frequency exospheric duct propagation experiments. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 25, 613-619.

TITHERIDGE, J. E. [1958] Variations in the direction of arrival of high-frequency radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **13**, 17-25.

TOMAN, K. [1979] High frequency ionospheric ducting – a review. *Radio Sci.*, Vol. 14, 447-453.

TOMAN, K. et MILLER, D. C. [1977] Computation study of long-range high-frequency ionospheric ducting. *Radio Sci.*, Vol. 12, 467-476.

TSEDILINA, E. E. [1975] Round-the-world radio wave propagation in ionospheric wave ducts. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 15, 371-374.

TOUCHENTSOVA, I. A., FICHOUK, D I. et TSEDILINA, E. E. [1975] Investigation of the global properties of ionospheric wave ducts. II. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 15, 62-66.

VILLARD, O. G. Jr., MULDREW, D. B. et WAXHAM, F. W. Jr. [1980] The magnetospheric echo box – A type of long-delayed echo explained. *QST*, Vol. 64, **10**, 11-14.

VOGE, J. [1961, 1962] Propagation guidée le long d'un feuillet atmosphérique ou exosphérique. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 16, **11-12**, 288-295 et Vol. 17, **1-2**, 34-44.

VSEKHSVYATSKAYA, I. S. et KALININE, You. K. [1979] Of interferentsii dekametrovykh voln vblizi antipoda. (Brouillages des ondes décamétriques au voisinage de l'antipode) *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 19, **3**, 470-473.

WAGNER, K. W. [1928] Beobachtungen über die Reflexion von Hertzschen Wellen im Weltraum, weit ausserhalb der Erde (Observations sur la réflexion des ondes radioélectriques dans l'espace, loin de la Terre). *Elektr. Nachr. Techn.*, **5**, 483.

WALKER, A. D. [1966] The theory of guiding of radio waves in the exosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 28, 1039-1056.

RAPPORT 1011

MODIFICATION ARTIFICIELLE DE L'IONOSPHÈRE PAR INJECTION DE PRODUITS CHIMIQUES

(Programme d'études 25F/6)

(1986)

Les premiers travaux ont consisté en injections de nuages de plasma [Marmo et autres, 1959], suivies d'une série d'expériences originales d'injections de produits chimiques [Rosenberg, 1964]. Kellogg [1964] a laissé entendre que l'atmosphère terrestre est suffisamment dense pour absorber tout choc dont on puisse raisonnablement imputer l'origine à une technologie aérospatiale. La combustion du moteur principal du laboratoire Skylab de la NASA a donné lieu à l'échappement d'environ 1000 kg/s de molécules H_2 et H_2O dans une région située entre 200 et 440 km d'altitude, ce qui a déclenché un appauvrissement de l'ionosphère d'une dimension inconnue jusque là (voir la Fig. 1). Ce «trou ionosphérique» artificiellement créé équivalait à une diminution de près de 50% du contenu électronique total de l'ionosphère (CET), sur une région d'environ un million de km^2. Mendillo et autres [1975a, b] ont attribué cet effet à l'expansion explosive d'un nuage de produits d'échappement constitués de molécules extrêmement actives, laquelle provoquait une recombinaison rapide du plasma ionosphérique.

L'introduction dans la haute atmosphère de produits d'échappement typiques des fusées tels que H_2, H_2O et CO_2, entraîne la transformation du plasma d'ions atomiques de la région F en un plasma d'ions moléculaires à des vitesses de 100 à 1000 fois plus rapides que celles afférentes aux molécules naturelles de N_2 et de O_2.

Ces importantes réactions sont les suivantes:

$$O^+ + H_2O \xrightarrow{\kappa_1} H_2O^+ + O \qquad \kappa_1 = 2{,}4 \times 10^{-9}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (1)$$

$$O^+ + H_2 \xrightarrow{\kappa_2} OH^+ + H \qquad \kappa_2 = 2{,}0 \times 10^{-9}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (2)$$

$$O^+ + CO_2 \xrightarrow{\kappa_3} O_2^+ + CO \qquad \kappa_3 = 1{,}2 \times 10^{-9}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (3)$$

Lorsqu'un ion moléculaire est formé, sa recombinaison dissociative avec un électron du milieu ambiant se produit rapidement:

$$H_2O^+ + e^- \xrightarrow{\alpha_1} OH + H \qquad \alpha_1 = 3{,}0 \times 10^{-7}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (4)$$

$$OH^+ + e^- \xrightarrow{\alpha_2} H + O \qquad \alpha_2 = 1{,}0 \times 10^{-7}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (5)$$

$$O_2^+ + e^- \xrightarrow{\alpha_3} O + O \qquad \alpha_3 = 2{,}0 \times 10^{-7}\ \text{cm}^3/\text{s} \qquad (6)$$

il y a ainsi formation d'un «trou ionosphérique». Mendillo [1981] a fait l'historique des perturbations induites dans l'ionosphère par des fusées.

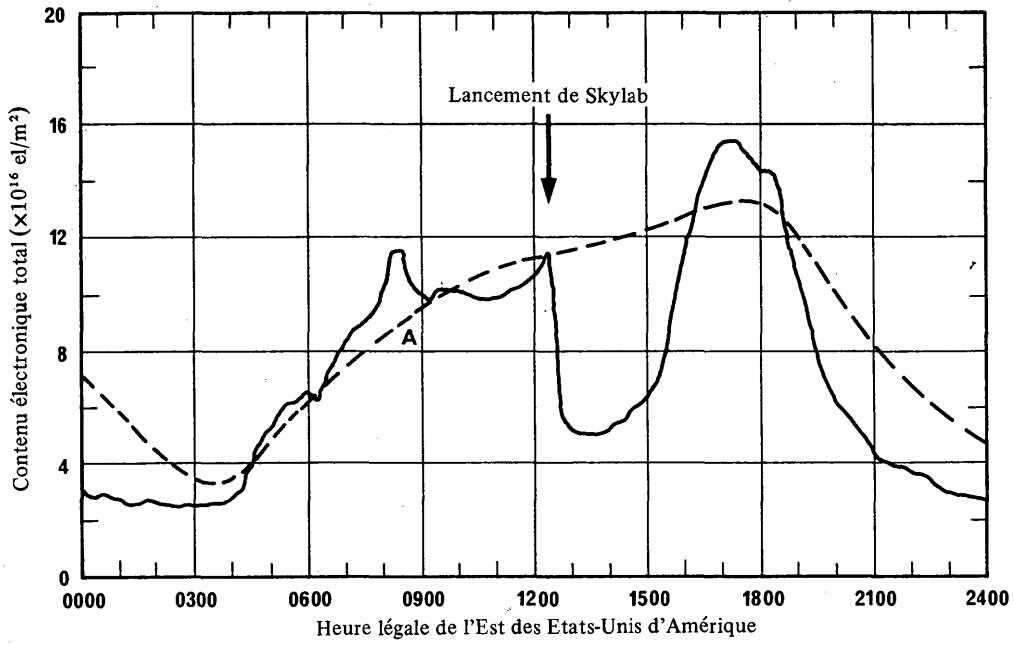


FIGURE 1 – *Données relatives au contenu électronique total (CET) utilisées pour déceler l'«effet Skylab» le 14 mai 1973*

Courbe A: présente l'allure qu'aurait eue le CET au cours de la journée, d'après une prévision médiane mensuelle actualisée en fonction des effets d'orages géomagnétiques [Mendillo et autres, 1975b]

Observations faites par ATS-3 à Sagamore Hill, Hamilton, MA, Etats-Unis d'Amérique.

La Fig. 2 représente schématiquement les nombreux processus physiques et chimiques associés aux appauvrissements artificiels de l'ionosphère et donne quelques indications sur les domaines dans lesquels ils peuvent avoir des conséquences pratiques [Rote, 1979]. Des modèles informatiques ont été réalisés par Bernhardt et autres [1975], Mendillo et Forbes [1978], Anderson et Bernhardt [1978], Zinn et Sutherland [1980], pour étudier la nature des appauvrissements du plasma ionosphérique. Un grand nombre d'entre eux ont été testés au moyen de charges chimiques transportées par des fusées dans le cadre des projets LAGOPEDO [Pongratz et Smith, 1978] et WATERHOLE [Whalen et autres, 1981], et lors du lancement par une fusée Atlas-Centaure du satellite HEO-3 [Mendillo et autres, 1979, 1980] et du satellite NOAA-3 [Mendillo et Baumgardner, 1982]. Mendillo et Forbes [1982] ont étudié théoriquement les effets produits par les plasmas d'ions négatifs engendrés par l'hexafluor de soufre.

MacDougall et autres [1981] ont fait des mesures de phase différentielle pendant l'expérience «Waterhole» au cours de laquelle 88 kg d'explosifs puissants ont produit un trou ionosphérique, ou un appauvrissement de la densité du plasma à environ 300 km d'altitude sur des lignes de force du champ connectées à un arc auroral. Ils en ont conclu que la précipitation de particules le long des lignes de force du champ magnétique à travers le trou créé par l'explosion était brusquement réduite. Whalen et autres [1981] et Yau et autres [1981] ont constaté que, dans les secondes qui suivent la libération:

- la précipitation d'électrons énergétiques observée dans le trou tombait aux niveaux ambiants,
- la luminosité de l'arc auroral observée au sol diminuait d'un facteur de 2, et
- la densité de la région E de l'ionosphère au-dessous du trou diminuait à un taux en accord avec une réduction subite de la précipitation de particules.

L'absence de modifications à grande échelle et persistantes dans les régions inférieures de l'ionosphère s'explique avant tout par le fait, étudié en détail par Forbes [1980], que, aux altitudes des régions D et E, il y a déjà prédominance de fortes densités d'éléments neutres et de réactions entre ions moléculaires.

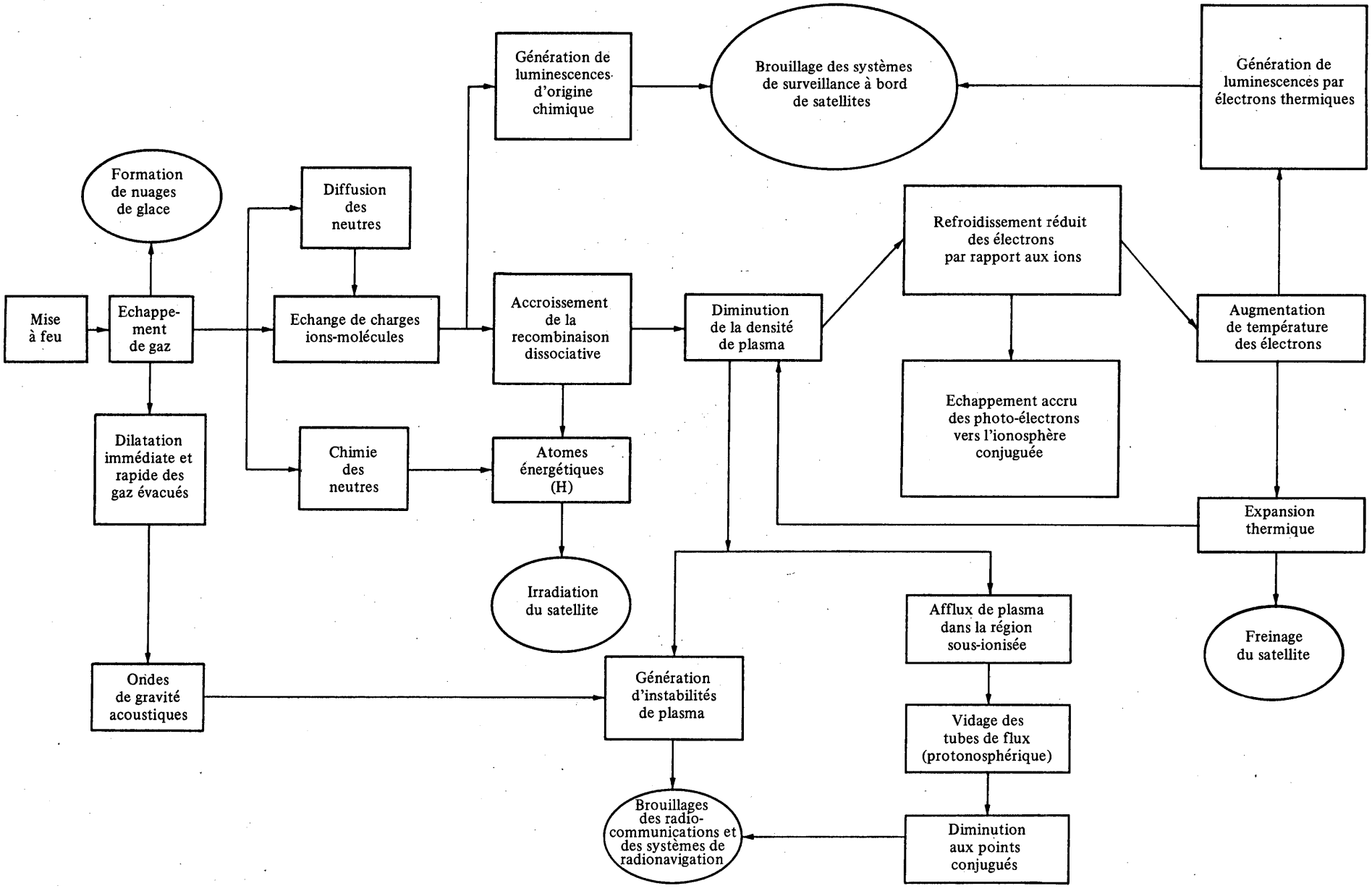


FIGURE 2 – *Schéma résumé des effets possibles de l'échappement d'une fusée sur la haute atmosphère (h > 200 km) [Rote, 1979]*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON, D. N. et BERNHARDT, P. A. [1978] Modelling the effects of an H_2 gas release on the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 4777-4790.

BERNHARDT, P. A., PARK, C. G., et BANKS, P. M. [1975] Depletion of the F_2 region ionosphere and protonosphere by the release of molecular hydrogen. *Geophys. Res. Lett.*, **2**, 341-344.

FORBES, J. M. [1980] Upper atmosphere modifications due to chronic discharges of water vapor from space vehicle exhausts. *Space Systems and their Interactions with Earth's Space Environment.* Eds. H. B. Garrett and C. P. Pike. AIAA, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

KELLOGG, W. W. [1964] Pollution of the upper atmosphere by rockets. *Space Sci. Rev.*, Vol. 3, 275-316.

MacDOUGALL, J. W., FULFORD, J. A. et FORSYTH, P. A. [1981] Ionospheric electron content measurements during «Waterhole». *Can. J. Phys.*, Vol. 59, 1170-1174.

MARMO, F. F., ASCHENBRAND, L. M. et PRESSMAN, J. [1959] Artificial electron clouds – I. *Planet and Space Sci.*, Vol. 1, 227-237.

MENDILLO, M. [1981] The effect of rocket launches on the ionosphere. *Adv. Space Res.*, **1**, 275-290.

MENDILLO, M., BAUMGARDNER, J. et KLOBUCHAR, J. A. [1979] Opportunity to observe a large-scale hole in the ionosphere. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 60, 513.

MENDILLO, M. et BAUMGARDNER, J. [1982] Optical signature of an ionospheric hole. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 9, 215-218.

MENDILLO, M. et FORBES, J. M. [1978] Artificially created holes in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 151-162.

MENDILLO, M. et FORBES, J. [1982] Theory and observation of a dynamically evolving negative ion plasma. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 8273.

MENDILLO, M., HAWKINS, G. S. et KLOBUCHAR, J. A. [1975a] A large-scale hole in the ionosphere caused by the launch of Skylab. *Science*, Vol. 187, 343-346.

MENDILLO, M., HAWKINS, G. S. et KLOBUCHAR, J. A. [1975b] A sudden vanishing of the ionospheric F-region due to the launch of Skylab. *J.Geophys. Res.*, Vol. 80, 2217-2228.

MENDILLO, M., ROTE, D. et BERNHARDT, P. A. [1980] Preliminary report on the HEAO – hole in the ionosphere. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 61, 529.

PONGRATZ, M. B. et SMITH, G. M. [1978] The LAGOPEDO experiments – and overview. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol. 59, 334.

ROSENBERG, N. W. (Ed.) [1964] PROJECT FIREFLY 1962-1963. Environmental Research Papers, N° 15, AFCRL-64-364. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom Field, MA 01730, Etats-Unis d'Amérique.

ROTE, D. M. [décembre 1979] Proceedings of the Workshop on ionospheric and magnetospheric effects of satellite power systems (SPS). Conference Report No. 7808115, US Dept. of Energy.

WHALEN, B. A., YAU, A. W., CREUTZBERG, F., GATTINGER, R. L., HARRIS, F. R., VALLANCE JONES, A., McNAMARA, A. G., PONGRATZ, M. B., SMITH, G. M., FORSYTH, P. A. et KOEHLER, J. A. [1981] Premilinary results from Project Waterhole – an auroral modification experiment. *Can. J. Phys.*, Vol. 59, 1175-1182.

YAU, A. W., WHALEN, B. A., CREUTZBERG, F., PONGRATZ, M. B. et SMITH, G. [1981] Observations of particle precipitation, electric field, and optical morphology of an artificially perturbed auroral arc: Project Waterhole. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 5601-5613.

ZINN, J. et SUTHERLAND, C. D. [1980] Effects of rocket exhaust products in the thermosphere and ionosphere. *Space Solar Power Rev.*, **1**, 109.

RAPPORT 887-1

MODÈLES DE PLASMAS EXTRATERRESTRES

(Programme d'études 25E/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Les trois caractéristiques les plus importantes du plasma extraterrestre, qui ont une influence sur les signaux radioélectriques se propageant dans le milieu interplanétaire, sont la densité électronique, N, le spectre unidimensionnel des fluctuations de la valeur quadratique moyenne de la densité électronique, V_{ne}, et la vitesse de déplacement de plasma (orienté et thermique). Le Tableau I donne des valeurs des caractéristiques de plasma se rapportant à l'espace interplanétaire, à la couronne solaire, à l'ionosphère et à la magnétosphère terrestres.

2. La couronne solaire et le vent solaire

Le vent solaire est un mélange complexe, variable avec le temps et de faible densité, de particules et de champs qui émanent en permanence du Soleil. Depuis les prévisions théoriques de Parker [1958] et leur confirmation par des observations de satellite, la recherche sur le vent solaire est devenue une discipline scientifique à part entière impliquant de sérieures conséquences pour ce qui est de l'étude des relations entre le

Soleil et la Terre. C'est essentiellement à la suite de recherches effectuées pendant les années 70 par la photographie des rayons X d'origine solaire que l'on a pu affirmer que la majeure partie du vent solaire provient de trous coronaux, c'est-à-dire de régions de la haute atmosphère solaire présentant une topologie de champ magnétique ouvert. Le plasma coronal ne peut pas être confiné dans cette configuraion magnétique et il se répand librement dans le milieu interplanétaire. Certains chercheurs, par exemple Zirker [1977], ont expressément associé des jets récurrents de vent solaire de grande vitesse et faible densité à des troux coronaux. En outre, les éruptions solaires, et peut-être aussi d'autres phénomènes solaires, donnent lieu à l'émission de plasma solaire dans le milieu interplanétaire. Brandt [1970] et Hundhausen [1972] ont étudié le phénomène essentiel des jets de vent solaire, tandis que Holzer [1978] a mis cette étude à jour et l'a étendue au contexte des trous coronaux. Des modèles de jets émanant des trous coronaux sont étudiés par Suess [1979].

2.1 *Densité des plasmas*

Les densités électroniques à partir du Soleil jusqu'à la Terre sont données par le terme «couronne étendue» de la relation d'Allen-Baumbach [Allen, 1976]. Berman [1979] a analysé 16 évaluations de ce terme et recommande le modèle suivant (la distance R à partir du Soleil étant exprimée en unité de rayon solaire ($6{,}96 \times 10^8$ m)):

$$N(R) \approx \frac{2{,}21 \times 10^{14}}{R^6} + \frac{1{,}55 \times 10^{12}}{R^{2{,}3}} \qquad (1)$$

Dans ce modèle, la couronne intérieure est représentée par le premier terme, qui donne $N = 1{,}25 \times 10^{14}\ \mathrm{m}^{-3}$ pour $R = 1{,}1$; cette valeur est en accord avec le modèle d'Allen [1976] et devient égale au deuxième terme pour $R = 3{,}8$. (Pour les densités électroniques correspondant à des altitudes solaires plus petites, il convient d'utiliser des valeurs tabulées.) On obtient ainsi $N = 6{,}70 \times 10^6$ électrons $\cdot\ \mathrm{m}^{-3}$ à la distance de la Terre, ce qui est une valeur typique des densités de vent solaire observées. La densité du vent solaire peut cependant être extrêmement variable, sur une durée de quelques minutes à quelques heures. King [1979] a observé des variations entre des valeurs inférieures à 1 et des valeurs supérieures à $75 \times 10^6\ \mathrm{m}^{-3}$.

L'expression (1) s'applique bien aux latitudes héliographiques basses ($\pm$ 15°). Allen [1976] et Saito et autres [1977] ont observé que la densité électronique diminue d'un facteur de 4 à 5 entre l'équateur et le pôle, pour la couronne intérieure. Tyler et autres [1977] proposent un modèle représenté par une expression simple pour tenir compte de la variation en fonction de la latitude héliographique (θ); cette expression a été légèrement modifiée ici, pour être adaptée aux observations précitées:

$$N(R,\theta) \approx \left[\cos^2\theta + \frac{1}{25}\sin^2\theta\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

Cette expression peut être utilisée en liaison avec la formule (1), si on le désire. Il est douteux qu'elle s'applique pour R > 5.

2.2 *Inhomogénéités*

Woo et Armstrong [1979] ont caractérisé les fluctuations de la densité électronique radiale en fonction du spectre unidimensionnel des fréquences V_{ne} (mesuré *in situ* par des engins spatiaux). Ces auteurs donnent l'expression:

$$V_{ne}(f) = 0{,}052\ R^{-3{,}45} f_s^{-1{,}65} v^{-1} \qquad \frac{(\text{électrons/m}^3)^2}{\text{Hz}} \qquad (3)$$

et, si l'on admet que la vitesse du vent solaire, v, est constante et égale à 3×10^5 m/s:

$$V_{ne}(f) = 1{,}7 \times 10^{-7}\ R^{-3{,}45} f_s^{-1{,}65} \qquad \frac{(\text{électrons/m}^3)^2}{\text{Hz}} \qquad (4)$$

où R est exprimé en rayons solaires ($20 \leqslant R \leqslant 215$), f_s en Hz et v en m/s.

2.3 *Vitesse du plasma et champ magnétique*

Le vent solaire émane radialement du Soleil avec des vitesses qui, à la distance de la Terre, vont d'environ 300 km/s jusqu'à plus de 1000 km/s. Les champs magnétiques solaires sont entraînés en même temps que cet écoulement. Du fait que le Soleil tourne, une ligne de force de ce champ provenant d'un élément de surface donné du Soleil en sort en suivant le trajet des particules fluides émanant de cet élément. Par conséquent, pour un observateur terrestre – qui ne suit pas la rotation de la surface solaire – le champ magnétique décrit théoriquement une spirale d'Archimède qui part de la Terre pour revenir à son point d'origine sur le Soleil. Les observations indiquent qu'en moyenne le champ magnétique interplanétaire à la distance de la Terre tend effectivement à converger selon cette direction, qui est à environ 45° vers l'ouest de la ligne reliant la Terre au Soleil. Cependant, la direction et l'intensité du champ magnétique interplanétaire sont extrêmement variables; l'intensité totale est comprise entre quelques gammas et plusieurs dizaines de gammas.

TABLEAU I — *Caractéristiques de l'état du plasma dans l'espace interplanétaire, dans la couronne solaire et dans l'ionosphère terrestre, pour une onde radioélectrique de 2,3 GHz [Smith et Edelson, 1980]*

N°	Caractéristiques	Unités	*a)* Espace lointain		*b)* Espace circumterrestre		
			A	B	C	D	E
			Espace Interplanétaire 1 UA du Soleil	Couronne solaire, 4 R_S (1) du centre du Soleil	Magnétosphère 1 6,6 R_T (1) (orbite des satell. géost.)	Magnétosphère 2 4 R_T (1) (dans la plasmapause)	Ionosphère, Altitude 300 km
1.	Densité électronique, N	(m^{-3})	$7{,}5 \times 10^{6}$	$1{,}2 \times 10^{11}$	3×10^{7}	3×10^{8}	10^{12}
2.	Température effective, T	(K)	$1{,}5 \times 10^{5}$	$1{,}5 \times 10^{6}$	5000	10^{4}	1200
3.	Vitesse de circulation, v	(km/s)	450	72	—	—	—
4.	Champ magnétique, B_0	(gauss)	5×10^{-5}	0,14	10^{-3}	5×10^{-3}	0,4
5.	Fréquence des collisions, ν	(s^{-1})	$1{,}2 \times 10^{-5}$	$5{,}9 \times 10^{-3}$	$2{,}1 \times 10^{-3}$	$5{,}9 \times 10^{-2}$	1100
6.	Fréquence de plasma, f_N	(Hz)	$2{,}5 \times 10^{4}$	$3{,}1 \times 10^{6}$	$4{,}9 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{5}$	9×10^{6}
7.	Gyrofréquence électronique, f_H	(Hz)	140	$3{,}9 \times 10^{5}$	$2{,}8 \times 10^{3}$	$1{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{6}$
8.	$X = (\omega_N/\omega)^2$		$2{,}9 \times 10^{-12}$	$1{,}8 \times 10^{-6}$	$4{,}5 \times 10^{-10}$	$4{,}8 \times 10^{-9}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$
9.	$Y = \omega_H/\omega$		$6{,}1 \times 10^{-8}$	$1{,}7 \times 10^{-4}$	$1{,}2 \times 10^{-6}$	$6{,}1 \times 10^{-6}$	$4{,}9 \times 10^{-4}$
10.	$Z = \nu/\omega$		$8{,}5 \times 10^{-16}$	$4{,}1 \times 10^{-13}$	$1{,}6 \times 10^{-13}$	$4{,}1 \times 10^{-12}$	$7{,}9 \times 10^{-8}$
11.(1)	$n_0 = (1 - X)^{1/2}$		$1 - 1{,}4 \times 10^{-12}$	$1 - 9{,}2 \times 10^{-7}$	$1 - 2{,}2 \times 10^{-10}$	$1 - 2{,}4 \times 10^{-9}$	$1 - 7{,}7 \times 10^{-6}$
12.(1)	$n_{QL}\left[1 - X/(1-Y)\right]^{1/2}$		$1 - 1{,}4 \times 10^{-12}$ $+ \left[8{,}8 \times 10^{-20}\right]$	$1 - 9{,}2 \times 10^{-7}$ $+ \left[1{,}6 \times 10^{-10}\right]$	$1 - 2{,}2 \times 10^{-10}$ $+ \left[2{,}7 \times 10^{-16}\right]$	$1 - 2{,}4 \times 10^{-9}$ $+ \left[1{,}5 \times 10^{-14}\right]$	$1 - 7{,}7 \times 10^{-6}$ $+ \left[7{,}5 \times 10^{-9}\right]$
13.(1)	$n_g = 1/n_0$		$1 + 1{,}4 \times 10^{-12}$	$1 + 9{,}2 \times 10^{-7}$	$1 + 2{,}2 \times 10^{-10}$	$1 + 2{,}4 \times 10^{-9}$	$1 + 7{,}7 \times 10^{-6}$
14.(1)	$n_g\, n_{QL}$		$1 + 8{,}8 \times 10^{-20}$	$1 + 1{,}6 \times 10^{-10}$	$1 + 2{,}7 \times 10^{-16}$	$1 + 1{,}5 \times 10^{-14}$	$1 + 7{,}5 \times 10^{-9}$
15.	Longueur de Debye, λ_D	(m)	9,8	0,24	21,8	0,40	$2{,}4 \times 10^{-3}$
16.	Etat du plasma λ_D/λ		75 (chaud)	1,8 (tiède)	168 (chaud)	3,1 (tiède)	$1{,}8 \times 10^{-2}$ (froid)
17.	Champ magnétique critique, B_c	(gauss)	$7{,}6 \times 10^{-5}$	$3{,}1 \times 10^{-2}$	$2{,}3 \times 10^{-5}$	$1{,}25 \times 10^{-4}$	$2{,}5 \times 10^{-3}$
18.	Contrôle magnétique B/B_c		0,66 (faible)	4,6 (modéré)	43,5 (fort)	40 (fort)	160 (très fort)

(1) R_S est le rayon solaire, R_T le rayon de la Terre, n_0 est l'indice de réfraction isotrope, n_{QL} est l'approximation quasi longitudinale de l'indice de réfraction, n_g est l'indice de réfraction de groupe pour un milieu isotrope. Les valeurs entre crochets au point 12 sont les différences $n_{QL} - n_0$ que l'on peut considérer comme négligeables.

TABLEAU II – *Propriétés des atmosphères et ionosphères planétaires* *

Caractéristiques	Planètes								
	Mercure	Vénus	Terre (2)	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton
Distance moyenne du Soleil (UA) (1)	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,539	19,28	30,06	39,72
Principaux composants atmosphériques	Aucun (traces de He, H)	CO_2 (96%)	Azote (78%) Oxygène (21%)	CO_2 (95%)	Hydrogène (89%) Hélium (11%)	Hydrogène (94%) Hélium (6%)	Hydrogène (85%) Méthane (10%)	Hydrogène Hélium Méthane	Méthane
Température diurne moyenne à la surface visible (°C)	427	460	22	−60	−100	−180	−210	−220	−230
Pression atmosphérique à la surface (mbar)	$< 2 \times 10^{-10}$	93 000	1000	7-9	1000	> 1000	>10 000	$> 10^6$	< 50
Pesanteur à la surface (Terre = 1)	0,37	0,88	1,0	0,38	2,64	1,32	0,85	1,4	?
Ionosphère	Aucune détectée	Bien développée mais variable	D, E, F1, F2	F1	Oui	Oui	Oui	Oui	Indéterminée
Densité électronique maximale (électrons par m^3)	$< 4 \times 10^9$	10^{11} à 10^{12}	2×10^{12}	10^{11}	2×10^{11}	$2{,}3 \times 10^{10}$	10^{11}	$< 10^{11}$	?
Hauteur de la densité électronique maximale (km)		150-200	250-400	125	1600	2500	500	?	?
Champ magnétique	Oui-faible	Aucun détecté	Oui-fort	Oui-faible	Oui-fort	Oui-fort	Oui-faible	Aucun détecté	Peu probable
Moment du dipôle magnétique (G cm^3)	$1{,}8$ à 6×10^{22}	$< 4{,}3 \times 10^{16}$	8×10^{25}	$< 1{,}0 \times 10^{22}$	$1{,}55 \times 10^{30}$	$4{,}3 \times 10^{28}$	?		

* [Allen, 1976; Smith et West, 1983].

(1) L'unité astronomique (distance moyenne de la Terre au Soleil) vaut $1{,}496 \times 10^8$ km.

(2) Voir les Rapports 725 et 263.

3. Ionosphères et magnétosphères planétaires

A mesure que l'exploration des planètes se poursuit, nous recueillons des données plus nombreuses et plus précises sur les autres membres du système solaire. Trois planètes (Jupiter, Saturne et Uranus) ont des anneaux et il se peut que Neptune en ait aussi. Certaines planètes et même certains de leurs satellites ont d'importantes atmosphères et certaines ont des champs magnétiques propres suffisamment intenses pour former autour d'elles une magnétosphère qui les protège de l'impact direct du plasma du vent solaire. L'atmosphère ou la magnétosphère d'une planète risque de causer une distorsion d'un signal radioélectrique se propageant dans le milieu interplanétaire, aussi a-t-on résumé dans le Tableau II les paramètres atmosphériques, ionosphériques et magnétosphériques pertinents tels qu'on les connait actuellement, pour chaque planète du système solaire. On trouvera des renseignements plus détaillés dans les références citées dans le Tableau II.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEN, C. W. [1976] *Astrophysical Quantities*, The Athlone Press, University of London, Londres, Royaume-Uni.

BERMAN, A. L. [1979] A unified observational theory for solar wind columnar turburlence. Deep Space Network Progress Report 42-50, 743-808, NASA-JPL, California institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91103, Etats-Unis d'Amérique.

BRANDT, J. C. [1970] *Introduction to the Solar Wind*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, CA, Etats-Unis d'Amérique.

HOLZER, T. E. [1978] The solar wind and related astrophysical phenomena. *Solar System Plasma Physics: A Twenthieth Anniversary Overview*, Ed. C. F. KENNEL, L. J. LANZEROTTI et E. N. PARKER, North-Holland Publishing Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

HUNDHAUSEN, A. J. [1972] *Coronal Expansion and Solar Wind* Springer-Verlag, New York Heidelberg, Berlin.

KING, H. [1979] *Interplanetary Medium Data Book*, Supplement 1, NASA NSSDC/WDC-A-R&S, 79-08-Suppl-1.

PARKER, E. N. [1958] Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophys. J.*, Vol. 128, 664-676.

SAITO, K., POLAND, A. J. et MUNRO, R. H. [1977] A study of the background corona near solar minimum. *Solar Phys.*, Vol. 55, 121-234.

SMITH, E. K. et EDELSON, R. E. [1980] Radio propagation through solar and other ionized media. JPL Publication 79-117, NASA-JPL, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91103, Etats-Unis d'Amérique.

SMITH, R. E. et WEST, G. S. (Compilers) [1983] Space and planetary environment criteria guidelines for use in space vehicle development. 1982 Revision, Vol. I et II, NTIS N83-18816/9 et N83-28061/0. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

SUESS, S. T. [1979] Models of coronal hole flows. *Space Sci. Revs.*, Vol. 23, **2**, 159-200.

TYLER, G. L., BRENKLE, J. P., KOMAREK, T. A. et ZYGLIEBAUM, A. I. [1977] The Viking solar corona experiment. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 4335-4340.

WOO, R. et ARMSTRONG, J. W. [1979] Spacecraft radio scattering observations of the power spectrum of electron density fluctuations in the solar wind. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, **12**, (Paper 9A0771), 7288-7296.

ZIRKER, J. B. [1977] Coronal holes and high speed wind streams. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 15, 257-269.

SECTION 6K: PROBLÈMES D'EXPLOITATION

Recommandations et Rapports

RECOMMANDATION 313-5

ÉCHANGE DE RENSEIGNEMENTS EN VUE DES PRÉVISIONS A COURT TERME ET TRANSMISSION DES AVERTISSEMENTS DE PERTURBATIONS IONOSPHÉRIQUES

(Question 27/6)

(1951-1959-1966-1974-1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

qu'il peut être avantageux pour certains services de radiocommunication d'être avertis aussi longtemps à l'avance que possible du début probable de perturbations de la propagation ionosphérique,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que chaque pays participant aux recherches sur la propagation désigne un organisme officiel chargé de recevoir, de coordonner et d'échanger les renseignements nécessaires à l'établissement des prévisions à court terme et d'établir la liaison avec les organismes correspondants des autres pays;

2. que ces renseignements soient transmis aux organismes ci-dessus par les moyens de télécommunication les plus directs;

3. que les données nécessaires aux prévisions à court terme susceptibles d'être utilisées dans un délai de 48 heures soient diffusées conformément aux décisions du Service international des Ursigrammes et Jours mondiaux (IUWDS) par les voies de communication appropriées disponibles, les autres données étant diffusées par voie postale ordinaire ou aérienne ou, sur demande, par voie radioélectrique ou par tout autre moyen rapide de communication, et que des émissions brèves et régulières donnant des avertissements à court terme des perturbations ionosphériques soient faites par des stations radioélectriques de grande portée;

4. que les codes à utiliser pour les communications et diffusions indiquées ci-dessus soient intégralement normalisés, conformément aux décisions et aux mesures prises par l'IUWDS;

5. que les administrations et exploitations faisant usage des services ci-dessus soient invitées à comparer les prévisions au comportement réel des circuits radioélectriques, à évaluer l'exactitude des prévisions, à fournir des archives et à faire toute suggestion de nature à faciliter les études qui doivent être entreprises en vue d'améliorer les méthodes employées;

6. qu'il est souhaitable que les études entreprises dans le cadre de la Question 27/6 aboutissent à l'élaboration d'une méthode commune de description des perturbations et des variations de l'ionosphère, cela en vue de la corrélation entre les prévisions et le comportement des services de radiocommunication;

7. que, dans le cas où les administrations ont créé des moyens d'échange rapide des renseignements au titre de l'IUWDS, ces moyens soient maintenus et, si besoin est, développés.

ANNEXE I

DISPONIBILITÉ ET ÉCHANGE DE DONNÉES DE BASE POUR LES PRÉVISIONS CONCERNANT LA PROPAGATION

1. Introduction

Sauf aux très courtes distances, la propagation des signaux radioélectriques entre 3 et 30 MHz n'est principalement possible, avec de faibles valeurs de l'affaiblissement, que grâce à des réflexions sur l'ionosphère et sur le sol. Sur une liaison déterminée, on peut généralement obtenir des communications de qualité satisfaisante si la fréquence de travail est comprise entre une limite inférieure (LUF) et une limite supérieure (MUF d'exploitation) qui sont déterminées par les caractéristiques de l'ionosphère. On a constaté que la gamme des fréquences utilisables en exploitation est encore plus étroite pour certaines catégories de systèmes de communication à grande capacité.

En conséquence, il est nécessaire de posséder, le plus longtemps possible à l'avance, des renseignements sur les valeurs probables de ces limites supérieures et inférieures, ainsi que des prévisions à court terme et des avertissements concernant les perturbations. Dans leur ensemble, ces prévisions (à long et à court terme) et les avertissements de perturbations fournissent au personnel chargé de l'établissement des projets et de l'exploitation des renseignements qui peuvent permettre d'utiliser au mieux des ressources limitées en équipement et en

fréquence. Les prévisions à long et moyen terme renseignent sur les états représentatifs de l'ionosphère. Il est donc extrêmement utile au personnel d'exploitation d'être informé des perturbations ionosphériques prochaines pour pouvoir détourner le trafic, donner par avance des instructions de modifications temporaires de la fréquence normale de travail et déterminer la qualité de transmission sur d'autres systèmes affectés par l'état de l'ionosphère.

2. Données disponibles pour les prévisions de la propagation radioélectrique

2.1 *Prévisions à long terme*

Dans plusieurs pays, des organismes élaborent actuellement des prévisions ionosphériques de 1 mois jusqu'à 12 mois à l'avance (voir Tableau I); certains organismes font également des prévisions portant sur un cycle solaire complet. Ces prévisions concernent les états représentatifs de l'ionosphère. Dans la plupart des cas, les renseignements, publiés sous forme de graphiques concernant toutes les parties du monde, peuvent être échangés entre les divers organismes intéressés.

2.2 *Prévisions à court terme des perturbations*

Dans plusieurs pays, des organismes préparent actuellement des prévisions à court terme des perturbations ionosphériques de quelques heures à 27 jours à l'avance (voir Tableau I). Ces prévisions complètent les prévisions à long terme, car les perturbations ionosphériques, qu'il n'est pas possible de prévoir longtemps à l'avance, peuvent modifier considérablement la bande de fréquences à l'intérieur de laquelle une liaison particulière peut être exploitée dans des conditions satisfaisantes. Certains organismes exploitants ont manifesté un tel intérêt pour ces prévisions à court terme qu'elles sont actuellement radiodiffusées à des heures régulières (voir Tableau I).

2.3 *Documents de travail pour les prévisions à long terme*

L'Atlas CCIR des caractéristiques ionosphériques (Rapport 340) constitue la source de renseignements concernant la MUF de référence et la FOT qui sont à utiliser conjointement avec la valeur prévue de la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires R_{12} pour faire des prévisions à long terme pour toutes les parties du monde.

3. Echange des données de base utilisées dans les prévisions à court terme

3.1 Pendant longtemps, les données scientifiques d'un intérêt direct pour l'établissement des prévisions et des études des perturbations ionosphériques ont été radiodiffusées par divers pays dans des messages désignés sous le nom d'Ursigrammes. Depuis 1962, des données sont rassemblées, coordonnées et échangées par des moyens rapides à l'aide de codes synoptiques appropriés, par l'intermédiaire du Service International des Ursigrammes et Jours Mondiaux (IUWDS) (Service permanent de l'URSI en collaboration avec l'UAI et l'UGGI, membres de la Fédération des Services astronomiques et géophysiques). Ces messages prévoient l'échange, sous une forme succincte, des données qu'il est nécessaire de connaître, dans un délai de moins de quarante-huit heures après leur obtention, pour la préparation des prévisions à court terme et des travaux urgents analogues. Ces échanges se font par l'intermédiaire de réseaux régionaux, qui comprennent des observatoires, des laboratoires, des services de communication et des centres régionaux. Les centres régionaux échangent à leur tour, une fois par jour, des résumés d'informations concernant les éruptions solaires, les perturbations ionosphériques à début brusque, la couronne solaire et les émissions radioélectriques solaires, les taches solaires, l'activité ionosphérique et magnétique, ainsi que les prévisions. Les centres régionaux d'alertes qui fonctionnent en Australie, en France, au Japon, en République fédérale d'Allemagne et en URSS, ainsi que les centres régionaux associés en Inde, en République socialiste tchécoslovaque et en République populaire de Pologne rassemblent les données dans leurs régions et les transmettent par télégramme au Centre mondial des alertes de l'IUWDS (à Boulder, Colorado) qui a également rassemblé les données de sa région. Le Centre mondial des avertissements de l'IUWDS décide, compte tenu des avis des autres centres, s'il y a lieu de déclencher une ALERTE GÉOPHYSIQUE (diffusée peu après qu'un événement solaire ou géophysique exceptionnel s'est produit ou a commencé), période au cours de laquelle de nombreuses stations géophysiques exécutent des programmes spéciaux d'observations. Ces décisions sont transmises aux stations scientifiques du monde entier participant au programme, par divers moyens de communication rapides, notamment par le réseau météorologique de téléimprimeurs coordonné par l'OMM.

3.2 Les données échangées entre les divers centres régionaux ont trait aux éruptions solaires, à la couronne solaire, aux émissions radioélectriques d'origine solaire, aux rayons cosmiques, aux fréquences critiques de l'ionosphère, aux perturbations ionosphériques, au magnétisme terrestre et à la qualité de la propagation radioélectrique. Les données sont recueillies et transmises en codes synoptiques simples. On peut se procurer des fascicules de codes auprès du Dr R. Thompson, Président du Comité de direction de l'IUWDS, IPS Radio and Space Services, P.O. Box 702, Darlinghurst 2010, New South Wales, Australie ou de M. G. Heckman, Secrétaire pour les Ursigrammes, IUWDS, Steering Committee, NOAA, Boulder, Colorado 80303, Etats-Unis d'Amérique. Les centres régionaux auprès desquels on peut obtenir des précisions sur les données et les horaires des émissions et des bulletins figurent à la partie E du document intitulé «IUWDS Synoptic Codes for Solar and Geophysical Data», troisième édition révisée, 1973.

3.3 Le Tableau I énumère les services de centralisation qui ont été désignés pour recevoir, coordonner, transmettre et échanger les renseignements concernant la propagation radioélectrique.

TABLEAU I – *Liste des organismes chargés de l'échange de données et de la diffusion de prévisions concernant les conditions de propagation*

A: organisme chargé de l'échange de données générales sur la propagation.

RC: centre régional de l'IUWDS pour l'échange rapide de données nécessaires aux prévisions à court terme des perturbations.

L: organisme diffusant des prévisions à long terme établies pour un certain nombre de mois à l'avance: ce nombre de mois est indiqué en regard.

S: organisme diffusant des prévisions à court terme des perturbations.

Pays	Organisme	Adresse	A	RC	L	S
Allemagne (République fédérale d')	Forschungsinstitut der Deutschen Bundespost beim FTZ	Forschungsinstitut der DBP beim FTZ FI 34 - Postfach 5000 D 6100 Darmstadt Tel. Add.: Ionosphaere Darmstadt Télex: 419209	x	x	3	x
Argentine	LIARA	LIARA Av. Libertador N° 327 Vicente López, (B.A.)	x		6	
Australie	Department of Communications	Secretary Department of Communications P.O. Box 84 O Connor ACT 2601 Canberra Telex: AA 62025	x			
	IPS	IPS Radio and Space Services P.O. Box 702, Darlinghurst 2010 Telex: AA 20663		x	3	x
Belgique		Chef du service du Rayonnement Institut royal météorologique 3, Avenue Circulaire, Uccle, Bruxelles	x			
Brésil	CTA/ITA	Centro técnico Aeroespacial São José dos Campos São Paulo	x		1	
	I.Pg.M.	Instituto de Pesguisas da Marinha Ministério da Marinha Rio de Janeiro			1	
Canada	Department of Communications	Telecommunications Regulatory Service Engineering Support Division 1241 Clyde Avenue Ottawa, Ontario	x			
	Department of Communications	Communications Research Centre Shirley Bay P.O. Box 11490 - Station H Ottawa, Ontario K2H 8S2 Telex: 0534143			6	
Chine (République populaire de)	CRIRP	Director China Research Institute of Radiowave Propagation P.O. Box 138 Xinxiang, Henan Telex: Xinxiang 2525	x		6	x

TABLEAU I *(suite)*

Pays	Organisme	Adresse	A	RC	L	S
Espagne		Departamento de Servicios Técnicos de Telecomunicación Dirección General de Correos y Telecomunicación, Madrid	x			
Etats-Unis d'Amérique	NOAA Environmental Research Laboratories	Space Environment Services Center NOAA R/E/SE2 325 Broadway Boulder, Colorado 80303 Telex: 888776	x	x		x (1)
	NOAA Environmental Data and Services Information	World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics NOAA E/GC2 325 Broadway Boulder, Colorado 80303			6 voir Note	
	National Telecommunications and Information Administration	Institute for Telecommunication Sciences 325 Broadway Boulder, Colorado 80303	x			
France	CNET	Service des Ursigrammes Observatoire de Paris F-92190 Meudon Télex: 200590	x	x		x
		Service des Prévisions Ionosphériques CNET Route de Trégastel F-22301 Lannion Cedex Télex: 950327	x		3	x (2)
Inde	Council of Scientific and Industrial Research	The Secretary Radio Research Committee National Physical Laboratories Hillside Road, New Delhi, 12	x	x	6	
	India Meteorological Department	Kodaikanal Observatory				x
	All India Radio	Research Department, All India Radio Indraprastha Estate, New Delhi-1	x			
Italie		Istituto Nazionale di Geofisica Città Universitaria, Rome Adr. tél.: Geofisica, Rome (Faire précéder tous les messages du mot «Ionosphère»)	x			
Japon	RRL	Radio Research Laboratories Ministry of Post and Telecommunications 2-1, Nukui-kita-machi, 4-chome Koganeishi, Tokyo, 184 Telex: 2832611	x	x	3	x (3)
Mexique	SCT	Dirección General de Telecomunicaciones Estación de sondeo ionosférico Xola y Universidad, Mexico, (12) DF	x			

(1) Renseignements sur l'état du Soleil et sur la géophysique diffusés par WWV.

(2) Messages journaliers et hebdomadaires diffusés par télex.

(3) Avertissements diffusés par JJY.

Note. – Le «World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics» reçoit et diffuse des données ionosphériques provenant de zones géographiques dont les pays ne sont pas directement représentés à l'UIT en tant que Membres.

TABLEAU I *(suite)*

Pays	Organisme	Adresse	A	RC	L	S
Pays-Bas	PTT	Afdeling «Ionosfeer en Radioastronomie» St. Paulus St. 4, Leidschendam	x			
Pologne (République populaire de)	Académie des Sciences de Pologne Centre de Recherche spatiale	Service de Prévisions héliogéophysiques – Académie des Sciences de Pologne Centre de Recherche spatiale Ordona 21 01-293, Varsovie Télex: 815670 cbkpl		x		x
République démocratique allemande	RFZ	Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt Berlin-Adlershof, Agastrasse Télex: 0158720	x		3	
	HHI	Heinrich-Hertz-Institut für solar-terrestrische Physik Juliusruh/Rügen Télex: 318422	x			x
Royaume-Uni	Rutherford Appleton Laboratory	Director, Rutherford Appleton Laboratory Chilton, Didcot Oxfordshire, OX11 OQX Telex: 83159	x		6	
	GEC Research Laboratories	Marconi Research Centre Great Baddow Chelmsford Essex CM2 8HN Telex: 99201			6	x
République Sudafricaine	CSIR	National Institute for Telecommunications Research 18a Gill Street P.O. Box 3718 Observatory Johannesburg, 2000	x		1	
Suède		Central Administration of Swedish Telecommunications Development Department, S-12386 Farsta Adr. tél.: Radiogen, Stockholm	x		3	
Suisse		Division Radio et Télévision Direction Générale des PTT 21, Viktoriastrasse CH-3000 Berne 33	x			
République socialiste Tchécoslovaque		Institut de géophysique de l'Académie des Sciences Bočni 2, 14100 Praha 4, Spořilov		x		
URSS	Service hydrométéorologique	Service hydrométéorolorique Institut de géophysique appliquée Moscou	x	x	3	x [4]

[4] Avertissements diffusés par RDZ et RND.

RAPPORT 727-2

PRÉVISION A COURT TERME DES VARIATIONS D'ORIGINE SOLAIRE DES CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATION POUR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 27A/6)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de la prévision à court terme de l'activité solaire et de celle des perturbations magnétiques et ionophériques ainsi que des perturbations des radiocommunications qui font suite à certaines manifestations de l'activité solaire. Il énumère ensuite les références des services de prévision à court terme actuellement assurés. Les prévisions des variations d'un jour à l'autre des caractéristiques de l'ionosphère, portant principalement sur la foF2 et sur le contenu électronique total, font l'objet du Rapport 888.

2. Relations Soleil-Terre: historique et sources

La documentation dans ce domaine se trouve principalement dans deux séries indépendantes de publications: celles du Comité spécial de Physique Soleil-Terre (SCOSTEP), qui organise tous les quatre ans, en coopération avec le Committee on Space Research (COSPAR), des symposiums consacrés à ce sujet et celles du Service international des Ursigrammes et Jours mondiaux (IUWDS) qui a inauguré une série périodique d'ateliers consacrés plus spécialement aux techniques de prévision de ces relations Soleil-Terre [Simon et autres, 1986; Donnelly, 1979].

3. Prévision à court terme de l'activité solaire

La prévision de l'activité solaire a trois applications dans le domaine de la prévision à court terme des caractéristiques ionosphériques: premièrement, comme signe indicateur de la probabilité d'apparition d'éruptions solaires provoquant un accroissement d'absorption dans la région D; deuxièmement, comme signe indicateur de l'apparition possible des événements et situations solaires susceptibles d'être suivis de perturbations magnétiques et ionosphériques; troisièmement comme signe indicateur de variations à court terme du rayonnement ionisant du Soleil, conduisant à des variations des fréquences critiques ionosphériques et des MUF de référence.

Il faut aussi, à des fins scientifiques et autres, localiser les régions actives qui sont susceptibles de donner naissance à des éruptions à protons, et aussi reconnaître ces éruptions dès leur début.

Les données des émissions de rayonnement optique, radioélectrique et X du Soleil sont collectées journellement dans les centres régionaux de l'IUWDS [IUWDS, 1973]. Les observations effectuées et reçues dans ces centres sont utilisées pour la prévision de l'activité solaire et de ses effets connexes sur le comportement des systèmes de radiocommunications.

Les observations solaires permettent de déterminer quelques heures ou quelques jours à l'avance les régions du disque solaire où prendront naissance des éruptions Hα, ainsi que les effets de ces éruptions. Les éléments de base pour ces prévisions sont les spectrohéliogrammes solaires (Hα, calcium), les magnétogrammes solaires, les cartes radioélectriques établies pour les longueurs d'ondes millimétriques et centimétriques et les rapports quotidiens sur les éruptions Hα observées [Simon et autres, 1969; Martres et autres, 1973; Bleiweiss et autres, 1977; Stasiewicz et autres, 1979; Severny et autres, 1979; Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979].

Certaines des données relatives aux éruptions Hα permettent de prévoir l'apparition d'une absorption de la calotte polaire (PCA) quelques dizaines de minutes à l'avance. Ces données sont les suivantes: position de l'éruption sur le disque solaire par rapport à la position des taches solaires; sursauts sur ondes centimétriques; sursauts dans le spectre radioélectrique et sursauts de rayons X durs [Croom, 1971; Lange-Hesse et Rinnert, 1970; Tanaka et Enome, 1975; Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979; Smart et Shea, 1979].

La prévision à court terme de l'activité solaire est en grande partie subjective; elle est en général fondée sur le comportement de régions précédemment actives qui présentaient des caractéristiques semblables [Heckman, 1979]. On met actuellement au point des techniques objectives [Hirman et autres, 1980], mais le succès en est limité. Les sources de renseignements les plus complètes traitant de la question de la prévision de l'activité solaire et des éruptions solaires sont fournies par McIntosh et Dryer [1972] et Cook et McCue [1975].

4. Prévisions à court terme des perturbations magnétiques et ionosphériques

La prévision à court terme des perturbations magnétiques et ionosphériques est étroitement liée aux observations des phénomènes solaires et géophysiques qui se rapportent à ces perturbations ainsi qu'à l'envoi d'avertissements aux centres régionaux.

Ces observations comportent:

- des mesures, par satellite et au sol, des effets des fortes éruptions solaires dans le spectre des rayons X, des ondes optiques et des ondes radioélectriques [Heckman, 1979; Cook et Davies, 1979];
- des mesures au sol, dans le spectre optique et radioélectrique, des trous coronaux solaires [Heckman, 1979; Cook et Davies, 1979; Marubashi et autres, 1979];
- des mesures par satellite et au sol, des flux de protons d'énergie supérieur à 10 MeV [Bailey, 1964; Larsen, 1979];
- des mesures de la scintillation interplanétaire des radiosources, ayant pour objet d'identifier les perturbations qui se propagent à travers le milieu interplanétaire [Hewish, 1972; Coles et autres, 1974; Cronyn et autres, 1975];
- des mesures, à bord d'engins spatiaux, du plasma du vent solaire et du champ magnétique, y compris la valeur de la composante sud du champ interplanétaire ainsi que l'intensité générale de ce champ et sa direction (vers le Soleil ou en sens inverse) [Akasofu et autres, 1973; Foster et autres, 1971; Svalgaard, 1975; Russell et autres, 1975; Tsurutani, 1979].

4.1 *Perturbations ionosphériques à début brusque* (PIDB)

Le renforcement du flux de rayons X qui accompagne les grandes éruptions peut provoquer des perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB). Deux effets des éruptions solaires sont l'augmentation immédiate de la densité d'ionisation dans toute la région D et l'abaissement de la base de cette région. L'augmentation de la densité d'ionisation se traduit par une augmentation de l'absorption des ondes radioélectriques, qui provoque des évanouissements sur les ondes courtes. L'abaissement de la couche, en revanche, n'est pas important pour les ondes décamétriques mais cause des anomalies de phase soudaines sur les circuits à ondes myriamétriques. Les autres effets immédiats sont notamment l'absorption brusque du bruit cosmique, le renforcement brusque des bruits atmosphériques sur ondes myriamétriques, les augmentations brusques du contenu électronique total et les variations brusques du champ aux grandes longueurs d'onde [Mitra et Goyal, 1984]. Toutes ces questions ont été analysées par Larsen [1979]. Milsom [1986] donne une expression simple pour déterminer la probabilité pour qu'un évanouissement sur les ondes courtes se produise au cours des prochaines 24 heures.

Il est possible de prévoir avec un certain succès les aspects quantitatifs des PIDB qui résultent d'une éruption donnée en recourant à des modèles de la région D qui tiennent compte en détail des modifications d'ionisation induites par les rayons X d'une amplitude et d'une distribution spectrale données. Une fois qu'on a calculé le profil modifié de la densité électronique dans la Région D, il est relativement facile de déterminer les effets exercés sur certains circuits de télécommunication. Ces méthodes ont été décrites par Kłos et Stasiewicz [1979] et par Argo et Rothmuller [1979].

On a constaté que l'augmentation de la fréquence minimale observée (LOF) à la suite d'une éruption solaire est proportionnelle au renforcement des rayons X et à la distance zénithale du Soleil. [Rose et autres, 1974]. Des mesures du flux de rayons X de 1 à 8 Å, effectuées en temps réel, ont servi à prévoir la durée de l'interruption des communications en ondes décamétriques causée par un évanouissement des ondes courtes [Argo et autres, 1978a]. L'examen des caractéristiques d'apparition d'un tel événement a permis d'établir une relation directe entre la durée des évanouissements des ondes courtes et le maximum de l'évènement solaire à rayons X correspondant. Quant à la pente selon laquelle le phénomène disparaît, on est parvenu à la décrire avec précision en la rattachant à l'une des quatre constantes de temps exponentielles; le choix de la constante est dicté par la valeur du rapport de la variation du flux au temps d'établissement.

4.2 *Absorption dans la calotte polaire* (PCA)

Les événements solaires à protons peuvent donner lieu à des PCA, qui entraînent des interruptions complètes des radiocommunications aux latitudes élevées, en raison du fort accroissement de l'absorption. Les «éruptions à protons» présentent des caractéristiques particulières qui permettent de les prévoir, avec un certain succès, et d'en prévoir aussi les effets terrestres [Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979; Smart et Shea, 1979].

Grâce aux enregistrements du bruit radioélectrique solaire et aux mesures in situ des protons à haute énergie, on peut maintenant prévoir:

- si une éruption solaire particulière donnera lieu ou non à une absorption dans la calotte polaire,
- l'absorption maximale à laquelle on peut s'attendre dans le cas d'une perturbation solaire particulière [Castelli et Guidice, 1976].

Cliver [1976], Akinyan et autres [1979] et Akynyan et Chertock [1980] ont imaginé des méthodes permettant de prévoir l'intensité des principaux évènements du type PCA; ces méthodes sont fondées sur l'observation du flux solaire sur la longueur d'onde 10,7 cm.

Smart et Shea [1979] ont élaboré une procédure pour établir par ordinateur le profil en fonction du temps de l'intensité des protons solaires arrivant sur la Terre après une éruption solaire importante. La présence de sursauts de type II et de type IV dans le spectre radioélectrique est la caractéristique critique pour l'accélération des protons [Cliver et autres, 1985]. L'association observée entre les sursauts à spectre en U et les éruptions à protons résulte probablement du «Syndrome de la grande éruption» [Kahler, 1982].

En ondes myriamétriques, l'effet peut se manifester sous la forme d'une avance de phase supérieure à la normale dans les systèmes de navigation et de détermination de la position. Un modèle de correction du système de navigation Omega [Argo et Hill, 1976] transforme en corrections d'erreurs de phase les flux de protons de haute énergie (E > 10 MeV) mesurés aux altitudes des satellites. Les paramètres de ce modèle sont: le flux de protons intégrés (E > 10 MeV), l'heure du jour et la longueur du trajet à travers la calotte polaire.

4.3 *Orages géomagnétiques*

L'activité solaire donne souvent lieu à des perturbations géomagnétiques par suite de l'interaction du vent solaire et du champ magnétique terrestre. Ceci modifie le système des courants ionosphériques et magnétosphériques et provoque un orage géomagnétique et, indirectement, un orage ionosphérique.

La probabilité pour qu'une éruption solaire provoque un orage géomagnétique dépend de la position de l'éruption sur le disque solaire et de son énergie, indiquée par des phénomènes qui l'accompagnent: brillance optique, augmentation du rayonnement X et sursauts radioélectriques sur ondes centimétriques et métriques. L'ampleur de l'importance d'un évènement radioélectrique de type IV est également un précurseur important [McNamara, 1980].

Le «Comprehensive Flare Index» est un indicateur utile de la probabilité pour qu'une éruption provoque un orage géomagnétique [Dodson-Prince et autres, 1978]. Il en est de même du flux de rayons X intégré dans le temps entre 1 et 8 Å (mesure de l'énergie de l'éruption) [Heckman, 1979]. L'intervalle qui sépare l'éruption de l'orage est en général de 2 à 3 jours mais il est très difficile de le prévoir exactement en l'absence de mesures in situ par satellites, [Cook et Davies, 1979, Heckman, 1979].

Outre les orages géomagnétiques causés par les éruptions solaires, il existe une classe d'orages appelés orages récurrents en raison de leur tendance marquée à se répéter après une rotation solaire (27 jours). Ces orages sont liés aux caractéristiques de la couronne solaire connues sous le nom de «trous coronaux».

Les trous coronaux sont à l'origine de jets de vents solaires très rapides dont la vitesse est égale à plusieurs fois celle du vent solaire normal [Sheeley et Harvey, 1978; Nolte et autres, 1976]. Lorsque l'un de ces jets de vents solaires souffle au-dessus de la Terre, soit en général 3 ou 4 jours après le passage du trou coronal correspondant par le méridien central, les modifications induites dans la magnétosphère et dans l'ionosphère de la Terre peuvent donner lieu à des orages géomagnétiques et ionosphériques. Ces orages peuvent durer jusqu'à environ 7 jours. On constate que ces jets de vents solaires ne donnent pas tous lieu à des orages, leur influence à cet égard étant liée aux paramètres du vent solaire lui-même et à ceux du champ interplanétaire.

Les orages récurrents sont caractéristiques de la phase décroissante d'un cycle solaire où les trous coronaux et les jets de vents solaires associés peuvent durer jusqu'à 10 rotations solaires [Bohlin, 1977]. Du point de vue historique, les prévisions des orages récurrents ont été fondées sur un schéma de récurrence de 27 jours, dans lequel il est plus ou moins tenu compte des régions actives proches du trou coronal supposé [Cook et Davies, 1979]. On peut améliorer la fiabilité de ces prévisions en observant directement les trous eux-mêmes aux Rayons X, XUV, EUV ou à des longueurs d'ondes radioélectriques [Timothy et autres, 1975; Bohlin, 1977; Neupert et Pizzo, 1974; Dulk et Sheridan, 1974]. Toutefois, les observations les plus intéressantes sont les observations in situ des paramètres pertinents du vent solaire et de leurs modifications lors du passage de jets de vents solaires.

Les orages géomagnétiques ont également été imputés à des éjections du Soleil associées à des filaments à disparition brusque [Joselyn et McIntosh, 1981; McNamara et Wright, 1982]. La durée du temps de propagation est de 4 à 5 jours, et elle est moins grande pour les grands filaments que pour les filaments proches du méridien central [Wright et McNamara, 1983].

4.4 *Orages ionosphériques*

L'orage géomagnétique constitue souvent une bonne indication de l'existence simultanée d'un orage ionosphérique, c'est-à-dire de perturbations dans l'ionosphère, plus graves que les fluctuations habituelles d'un jour à l'autre.

Du point de vue des radiocommunications, les effets les plus importants des orages ionosphériques sont ceux intéressant la couche F2 qui est en fait la couche la plus affectée par les orages. Pour ce qui est de la fréquence maximale du plasma dans la couche F2 (foF2), les orages peuvent avoir pour effet soit de l'augmenter (phase positive), soit de la diminuer (phase négative). La phase négative est d'autant plus importante pour les radiocommunications qu'elle diminue la largeur de bande disponible. Evans [1973] et Rishbeth [1975] ont étudié les mécanismes physiques susceptibles d'expliquer le mécanisme des orages ionosphériques.

Aux latitudes moyennes, un orage typique commence par une phase positive de quelques heures, suivie d'une phase négative qui dure un ou deux jours. Cependant, l'amplitude de chaque phase est une fonction compliquée du moment du déclenchement de l'orage, de la latitude et de la saison; un orage donné peut ne présenter qu'un seul type de phase. Mendillo [1973], Matuura [1972], Mendillo et Klobuchar [1980] et Cander [1985] ont décrit les variations des effets des orages ionosphériques en fonction de ces trois derniers paramètres.

Les effets ionosphériques des orages récurrents semblent, pour l'essentiel, être les mêmes que ceux des orages causés par les éruptions, bien qu'ils aient tendance à être moins graves et à durer plus longtemps [McNamara, 1977a, b]. Une étude limitée des orages ionosphériques associés à des filaments à disparition brusque a montré que les effets de ces filaments ne peuvent être distingués de ceux des éruptions et des jets de vents solaires très rapides.

Les variations de la MUF de référence aux basses latitudes au cours des orages magnétiques sont en général plus faibles que les fluctuations de foF2 d'un jour à l'autre observées pendant les jours calmes. Aggarwal et Reddy [1974] ont constaté que l'augmentation de foF2 aux basses latitudes était compensé par une augmentation de hmF2, si bien que les variations réelles de la MUF de référence n'étaient pas significatives.

Aux latitudes élevées, on constate des modifications sensibles de la MUF de référence et de la fréquence minimale utilisable (LUF) pendant les perturbations géomagnétiques. Les modifications de l'absorption associées aux sous-orages magnétiques présentent des variations en longitude et en latitude dans la région de l'ovale auroral [Jelly, 1970]. L'utilisation de l'indice d'électrojet auroral est toutefois utile pour l'estimation de certaines caractéristiques de l'absorption aurorale des sous-orages [Elkins, 1972]. Verdile et Puig [1977] ont étudié des effets d'orages qui semblent en corrélation avec les indices magnétiques auroraux (AU, AL) et seraient dus à la propagation de perturbations originaires de l'ovale auroral.

4.5 *Méthodes utilisées en pratique pour les prévisions à court et à moyen terme*

Les prévisions de la durée et de l'importance d'un orage ionosphérique sont fondées essentiellement sur des modèles climatologiques des effets d'orage, étant donné le peu de succès de la prévision du comportement d'un orage déterminé [Argo et autres, 1978b]. Cependant [Kuleshova et autres [1980] ont, dans une certaine mesure, réussi à prévoir les variations de la MUF de référence pendant les orages, en analysant soigneusement les orages passés en fonction de la présence ou de l'absence de phases positives et négatives, des orages géomagnétiques à début brusque ou progressif et de l'importance des variations de foF2.

Il n'est pas possible d'effectuer des prévisions quantitatives précises des paramètres des circuits en se fondant uniquement sur les prévisions médianes mensuelles et sur la probabilité de perturbations magnétiques [Cook et McCue, 1975]. Ces prévisions présentent toutefois de l'intérêt pour de nombreux utilisateurs, en particulier lorsqu'elles sont confirmées après le début d'une perturbation.

Le comportement de l'ionosphère pendant un orage ionosphérique imputable à un phénomène ou événement solaire (éruption, trou coronal, filament à disparition brusque) peut être considéré comme un cas particulier de la variabilité d'un jour à l'autre de l'ionosphère, et peut être prévu par application des mêmes techniques (§ 2.5 du Rapport 888).

5. Effets des orages géomagnétiques sur le contenu électronique total (CET)

Les variations du CET par rapport aux conditions mensuelles moyennes sont dues avant tout à l'activité géomagnétique. Etant donné que les possibilités d'établissement de modèles théoriques ne sont pas suffisamment élaborées pour permettre la prévision du comportement du CET pendant des orages magnétiques, des programmes de prévision fondés sur la morphologie représentent la seule méthode viable actuellement disponible. Les principaux besoins des milieux dont les activités font appel à la propagation transionosphérique portent sur la période diurne, qui est celle pendant laquelle la valeur absolue de la différence du CET par rapport aux conditions moyennes mensuelles est maximale.

Mendillo et Klobuchar [1980] ont exposé l'état de la technique en matière de possibilités de prévision du CET au cours d'orages magnétiques, tandis que Mendillo [1973] a montré comment on peut prévoir si un orage en cours risque ou non de produire une phase positive aux latitudes moyennes. Mendillo a constaté que le début brusque d'un orage géomagnétique entraîne, aux latitudes moyennes, un accroissement du contenu électronique total au cours de l'après-midi qui suit ce début brusque, à moins qu'une forte dépression du champ géomagnétique ne se produise au cours des premières heures de la journée. En exploitation, on considère qu'il doit s'agir d'une dépression du champ d'au moins 100 gammas aux environs de 03 h 00 (heure locale), donnant une possibilité limitée de prévision avec une période d'anticipation d'environ 12 heures.

La principale incertitude rencontrée lorsque l'on tente d'appliquer au CET, pendant les orages magnétiques, des corrections basées sur la morphologie, porte sur la prévision de l'instant du début de l'orage, que ce début soit brusque ou progressif.

Les régions du monde pour lesquelles font défaut les morphologies et, par conséquent, les possibilités de prévision du comportement du CET au cours d'orages magnétiques sont les régions de basse latitude et les régions équatoriales ainsi que l'ensemble de l'hémisphère austral. Il apparaît que les corrélations entre les variations de l'ionosphère et les divers indices de perturbations géomagnétiques (par exemple, le CET par rapport aux indices K_p ou D_{st}) ne présentent pas beaucoup d'intérêt dans les prévisions des effets des orages magnétiques sur le CET.

6. Utilité et fiabilité des prévisions à court terme

Grâce à des méthodes de vérification, on a analysé le nombre de jours d'orages pour lesquels des prévisions correctes avaient été faites et le nombre des jours calmes pour lesquels on avait fait des prévisions d'orage ou émis de fausses alertes. Aux Etats-Unis d'Amérique, en République fédérale d'Allemagne et au Japon, on a établi, pour certaines zones géographiques, des indices de qualité de la propagation radioélectrique, pour la prévision et sa vérification.

On trouvera des descriptions des différents types de procédures de vérification dans les travaux de Heckman [1979], Marubashi et autres [1979] et Minnis [1977].

7. Systèmes opérationnels pour les prévisions à court terme

On trouvera dans ce paragraphe la liste des administrations et des organismes qui émettent actuellement des prévisions à court terme, avec des indications succinctes sur les services assurés. Il existe des publications qui donnent des renseignements complémentaires sur les Centres régionaux d'avertissement du Service International des Ursigrammes et des Jours Mondiaux [IUWDS, 1973]. On trouvera la description des opérations actuelles de la plupart des Centres régionaux de l'IUWDS dans le Volume I des Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Donnelly, 1979].

7.1 *Australie*

Ionospheric Prediction Service, Department of Science, Sydney (IUWDS-RWC)

Fonctionne tous les jours, prévisions sur demande.

Evanouissements sur ondes courtes et perturbations magnétiques pour trois valeurs de probabilités et trois niveaux d'intensité, avec des indications générales sur l'activité solaire et géophysique.

Fourniture de prévisions supplémentaires aux usagers, selon les latitudes des circuits.

7.2 *France*

7.2.1 *Observatoire de Paris et Centre national d'études des télécommunications, Meudon (IUWDS-RWC)*

Fermé les dimanches et jours fériés.

Prévisions de l'activité solaire et des orages magnétiques.

7.2.2 *CNET, Service des prévisions ionosphériques, Lannion*

Fermé les samedis, dimanches et jours fériés.

Prévisions journalières et hebdomadaires de la MUF de référence et de la LUF pour la Zone Europe et la Zone Europe Nord et pour des liaisons point-à-point à partir de la France.

7.3 *République fédérale d'Allemagne*

Forschungsinstitut der Deutschen Bundespost beim Fernmeldetechnischen Zentralamt (IUWDS-RWC)

Fermé les week-ends et jours fériés.

Analyse sur les 24 heures passées et prévisions pour les 24 heures suivantes de l'activité solaire et magnétique, de foF2, et des conditions de propagation entre l'Allemagne et cinq régions principales.

7.4 *Inde*

National Physical Laboratory, New Delhi (IUWDS Associate RWC)

Fermé les dimanches et jours fériés.

Prévisions pour les circuits établis en Inde.

7.5 *Japon*

Ministry of Post and Telecommunications, Radio Research Laboratories, Koganei and Hiraj Branch (IUWDS-RWC)

Fonctionne tous les jours.

Avertissements journaliers des perturbations radioélectriques (N = normal, U = instable, W = perturbé), radiodiffusés six fois par heure par JJY.

Prévisions hebdomadaires de la propagation pour les 7 jours suivants, distribués par la poste.

Système automatique de diffusion des avertissements concernant les perturbations radioélectriques, (RADWIS).

7.6 *Royaume-Uni*

Marconi Research Centre, Great Baddow

Fermés les week-ends et jours fériés.

Prévisions codées des écarts possibles de la LUF et de la MUF d'exploitation par rapport aux valeurs prévues, pour les 6 heures suivantes dans la Zone européenne, avec une évaluation des facteurs de qualité. Résumé en langage clair des conditions susceptibles de se produire et compte rendu sur les dernières 24 heures.

7.7 *Etats-Unis d'Amérique*

7.7.1 *National Oceanic and Atmospheric Administration, Space Environment Services Center (NOAA-SESC) Boulder*

(IUWDS-RWC et World Warning Agency).

24 heures sur 24, tous les jours.

Deux messages quotidiens sur l'activité solaire et géophysique: observation courante des rayonnements optiques, radioélectriques et X du soleil, du vent solaire et du champ magnétique, et prévisions des tendances de ces phénomènes. Alertes immédiates des événements importants.

7.7.2 *United States Air Force Global Weather Center (AFGWC)*

Prévisions de l'environnement spatial.

7.8 *URSS*

Service hydrométéorologique, Institut de géophysique appliquée, Moscou (IUWDS-RWC)

24 heures sur 24, tous les jours.

Prévisions à court terme des perturbations ionosphériques et magnétiques (mensuelles, tous les cinq jours, tous les deux jours et deux fois par jour) pour cinq régions de l'URSS (région polaire, zone aurorale, zone européenne, Asie centrale, Extrême-Orient).

7.9 *Les centres IUWDS*

Chaque centre régional de l'IUWDS diffuse chaque jour une Alerte géophysique indiquant le niveau d'activité à prévoir dans chaque région active du Soleil pendant la journée faisant l'objet de la prévision; à cela s'ajoute l'indication de l'activité géomagnétique prévue. L'agence mondiale d'avertissement de l'IUWDS (le centre de Boulder, aux Etats-Unis d'Amérique) compile ces avis et publie chaque jour une Alerte géophysique WWA établie sur la base des avis de chaque centre, y compris le sien propre. Cette Alerte géophysique sert principalement à programmer des études scientifiques mais elle est utile également aux centres qui diffusent des prévisions de perturbations de différentes sortes. Ce système fonctionne de façon ininterrompue depuis 1957 [IUWDS, 1973].

8. Coopération internationale

Il y a lieu d'attirer l'attention sur la Recommandation 313 et son Annexe. «Echange de renseignements en vue des prévisions à court terme et transmission des avertissements de perturbations ionosphériques.»

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGGARWAL, S. et REDDY, B. M. [1974] Effects of magnetic and solar activity on HF communications via F2 region. *Indian J. Radio and Space Phys.*, Vol. 3,**4**, 401-406.

AKASOFU, S. I., PERREAULT, P. D., YASUHARA, F. et MENG, C. I. [1973] Auroral substorms and the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **78**, 7490-7508.

AKINYAN, S. T. et CHERTOCK, I. M. [1980] Determination of PCA values using integral parameters of solar microwave flares. *Geomag. i Aeronom.*, **20**, 192-196.

AKINYAN, S. T., CHERTOCK, Z. M. et ZHULINA, E. M. [1979] Determination of PCA values from the characteristics of solar radio bursts, *STPP**, Vol. III, D27-D33.

ARGO, P. E. et HILL, J. R. [1976] Omega navigation disturbance correction tables. Naval Electronics Laboratory Centre TD 480, NTIS, Accession No. AD A028 972, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

ARGO, P. E., HILL, J. R. et ROTHMULLER, I. J. [1978a] X-ray flare and short-wave fade duration model. Naval Ocean Systems Centre TR 255, NTIS, Accession No. AD A057 284, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

ARGO, P. E., HILL, J. R. et ROTHMULLER, I. J. [1978b] Magnetic substorms and ionospheric storms. Naval Ocean Systems Centre TR 256, NTIS, AD A057 975, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

ARGO, P. E. et ROTHMULLER, I. J. [1979] PROPHET: An application of propagation forecasting principles. *STPP*, Vol. I, 312-321.

BAILEY, D. K. [1964] Polar cap absorption. *Planet. and Space Sci.*, **12**, 495-541.

BLEIWEISS, M. P., WEFER, F. L. et KONIGES, A. E. [1977] Emission and absorption at wavelengths of 8.6 mm and 2.0 cm as determining factors of T_e and N_e in the filament. Naval Ocean systems Centre TR 136, NTIS, Accession No. AD A044 559, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

BOHLIN, J. D. [1977] Extreme ultraviolet observations of coronal holes. 1. Locations, sizes and evolution of coronal holes, juin 1973-janvier 1974. *Solar Phys.* Vol. 51, 377-398.

CANDER, L. R. [1986] A morphology-based study of ionospheric storms as seen at Grocka Ionospheric station. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 559, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly (voir [Donnelly, 1979 et 1980]).

CASTELLI, J. P. et GUIDICE, D. A. [1976] Impact of current solar radio patrol observations. *Vistas in Astron.*, **19**, 335.

CLIVER, E. W. [1976] Parent-flare emission at 2.8 GHz as a predictor of the peak observation of polar-cap events. Naval Electronics Laboratory Centre TR 2015, NTIS, Accession N° AD A037 552 1761, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

CLIVER, E. W., McNAMARA, L. F. et GENTILE, L. C. [juillet 1985] Peak-flux-density spectra of large solar radio bursts and proton emission from flares. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, **A7**, 6251-6266.

COLES, W. A., RICKETT, B. J. et RUMSEY, V. H. [1974] Interplanetary scintillations. *Solar Wind Three*, 351-367. Ed. C. T. Russell, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

COOK, F. E. et DAVIES, P. [1979] A review of the operation of the IUWDS Regional Warning Centre at the Ionospheric Prediction Service, Sydney. *STPP*, Vol. I, 229-238.

COOK, F. E. et McCUE, C. G. [1975] Solar-terrestrial relations and short-term ionospheric forecasting. *Radio and Electron. Engr.* (Royaume-Uni), Vol. **45**, 11-30.

CRONYN, W. M., ERSKINE, F., SHAWHAN, S. D., GOTWALS, B. L. A. et ROELOF, E. C. [1975] Prediction of ionospheric effects associated with solar wind disturbances using interplanetary scintillation observations at 34.3 MHz, Proc. Symposium on the Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications, Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

CROOM, D. L. [1971] Forecasting the intensity of solar proton events from the time characteristics of solar microwave bursts. *Solar Physics*, **19**, 171-185.

DODSON-PRINCE, H. W., HEDEMAN, E. R. et MOHLER, D. C. [1978] Studies of geomagnetic storms and solar flares in the years of increasing solar activities, cycles 19 and 20 (1955-1957, 1965-1968). Report AFGL-TR-78-0267, Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

DONNELLY, R. F. [1979] Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:

Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.

Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.

Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.

Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.

DULK, G. A. et SHERIDAN, K. W. [1974] The structure of the middle corona from observations at 80 and 160 MHz. *Solar Physics*, **36**, 191-202.

ELKINS, T. J. [1972] A model of auroral substorm absorption. AFCRL environmental research paper, N° 404, AFCRL-TR-72-0413. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

EVANS, J. V. [1973] The causes of storm-time increases of the F-layer at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 593-616.

FOSTER, J. C., FAIRFIELD, D. H., OGILVIE, K. W. et ROSENBERG, T. J. [1971] Relationship of interplanetary parameters and occurrence of magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 6971-6975.

HECKMAN, G. [1979] Predictions of the Space Environment Services Center. *STPP*, Vol. I, 322-349.

HEWISH, A. [1972] Observations of the solar plasma using radio scattering and scintillation methods *Solar Wind*. Ed. C. P. Sonett et autres. NASA SP-308, 477-485 (et discussion, 485-493).

HIRMAN, J., NEIDIG, D. F., SAGRAVES, P. M., FLOWERS, W. E. et WIBORG, P. M. [1980] The application of multivariate discriminant analysis to solar flare forecasting. *STPP*, Vol. IV, C-64 à C-75.

IUWDS (International Ursigram and World Days Service) [1973] Synoptic Codes for Solar and Geophysical Data, third revised edition, IUWDS Secretariat, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique.

JELLY, D. H. [1970] On the morphology of auroral absorption during substorms. *Can. J. Phys.*, 3, **48** 335-345.

JOSELYN, J. A. et McINTOSH, P. S. [1981] Disappearing solar filaments: A useful predictor of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 4555-4564.

KAHLER, S. W. [1982] The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and microwave burst parameters. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 3439-3448.

KŁOS, Z. et STASIEWICZ, K. [1979] Estimation of solar flare influence on radio circuit transmission loss. *STPP*, Vol. I, 67-71.

KULESHOVA, V. P., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1980] Forecasting of δfoF2 variation for ionospheric disturbance. *STPP*, Vol. IV, C-37 à C-40.

LANGE-HESSE, G. et RINNERT, K. [1970] The reliability of transpolar VLF measurements as a method to forecast HF propagation disturbances. AGARD Conf. Proc. N° 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper N° 30. Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

LARSEN, J. R. [1979] Effects of D-region ionization on radio wave propagation. *STPP*, Vol. II, 617-654.

MARTRES, M. J., SORU-ESCAUT, I. et RAYROLE, J. [1973] Relationship between some photospheric motions and the evolution of active centres. *Solar Phys.*, **32**, 365-378.

MARUBASHI, K., MIYAMOTO, Y., KIDOKORO, T. et ISHII, T. [1979] Forecasts of geomagnetic activities and HF radio propagation conditions made at Hiraiso, Japon. *STPP*, Vol. I, 182-204.

MATUURA, N. [1972] Theoretical models of ionospheric storms. *Space Sci. Revs.*, **13**, 124-189.

McINTOSH, P. S. et DRYER, M. (Eds.) [1972] Solar Activity Observations and Predictions, Vol. 30, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, MIT Press, Cambridge, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

McNAMARA, L. F. [1977a] Recurrent storms and their effects on HF radio communications. *Monitor-Proc.* IREE Australie, 48-55.

McNAMARA, L. F. [1977b] Ionospheric storm effects on maximum usable frequencies on circuits around Australia. Ionospheric Prediction Service, Series R reports, IPS-R35, Sydney, Australie.

McNAMARA, L. F. [1980] Geomagnetic effects of solar flares observed during 1968-1978. Ionospheric Prediction Service Series R reports, IPS-R37, Sydney, Australie.

McNAMARA, L. F. et WRIGHT, C. S. [1982] Disappearing solar filaments and geomagnetic activity. *Nature*, Vol. 299, **5883**, 537-538.

MENDILLO, M. [1973] A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 21, 349-358.

MENDILLO, M. et KLOBUCHAR, J. A. [1980] A morphology based prediction scheme for the coupled latitudinal and local-time development of F-region storms. *STPP*, Vol. IV, C-15 à C-26.

MILSOM, J. D. [1986] Towards improving a short-term ionospheric forecasting service. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 524, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

MINNIS, C. M. [1977] La valeur économique des prévisions des perturbations de l'ionosphère. *J. des Télécomm.*, Vol. 44, 328-330.

MITRA, S. N. et GOYAL, R. K. [1984] Study of solar-terrestrial relationship through SCL. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.

NEUPERT, W. M. et PIZZO, V. [1974] Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 3701-3709.

NOLTE, J. T., KRIEGER, A. S., TIMOTHY, A. F., GOLD, R. E., ROELOF, E. C., VAIANA, G., LAZARUS, A. J., SULLIVAN, J. D. et McINTOSH, P. S. [1976] Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys.* **46**, 303-322.

RISHBETH, J. [1975] F-region storms and thermospheric circulation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1055-1064.

ROSE, R. B., HILL, J. R. et BLEIWEISS, M. P. [1974] Sudden ionospheric disturbance grid. Naval Electronics Laboratory Centre Tech. Rep. 1938, NTIS, Accession N° A006567, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

RUSSELL, C. T., BURTON, R. K. et McPHERRON, R. L. [1975] Some properties of the Svalgaard A/C index. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1349-1351.

SEVERNY, A.B., STEPANYAN, N. N. et STESHENKO, N. V. [1979] Soviet short-term forecasts of active region evolution and flare activity. *STPP*, Vol. I, 72-88.

SHEELEY, N. R., Jr. et HARVEY, J. W. [1978] Coronal holes, solar wind streams and geomagnetic activity during the new sunspot cycle. *Solar Phys.*, **59**, 159-178.

SIMON, P., HECKMAN, G. et SHEA, M. A. [1986] Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

SIMON, P., MARTRES, M. J. et LEGRAND, J. P. [1969] Flare forecasting. *Symposium on Solar Flares and Space Research*, North-Holland Publishing Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

SMART, D. F. et SHEA, M. A. [1979] PPS76 – A computerized «event-mode» solar proton forecasting technique. *STPP*, Vol. I, 406-427.

STASIEWICZ, K., MAKSYMIENKO, M. et JAKIMIEC, M. [1979] KAZIA – A computer system for solar-terrestrial data processing and objective prediction. *STPP*, Vol. I, 61-66.

SVALGAARD, L. [1975] An atlas of interplanetary sector structure, 1957-1974, Stanford University, Institute for Space Research, Report N° 629, Stanford, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

TANAKA, H. et ENOME, S. [1975] The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares. *Solar Phys.*, **40** (1), 123-131.

TIMOTHY, A. F., KRIEGER, A. S. et VAIANA, G. S. [1975] The structure and evolution of coronal holes. *Solar Phys.*, **42**, 135-156.

TSURUTANI, B. [1979] Substorm warnings: an ISEE-3 real time data system. *EOS Trans.*, **60**, 702-703.

VERDILE, J. L. et PUIG, L. I. [1977] Propagación hacia latitudes medias de perturbaciones aurorales. Informe C-30 LIARA Laboratorio Ionosférico de la Armada, République d'Argentine.

WRIGHT, C. S. et McNAMARA, L. F. [1983] The relationships between disappearing solar filaments, coronal mass ejections, and geomagnetic activity. *Solar Phys.*, Vol. 87, 401-417.

RAPPORT 888-1

PRÉVISION A COURT TERME DES FRÉQUENCES CRITIQUES, DES FRÉQUENCES MAXIMALES UTILISABLES D'EXPLOITATION ET DU CONTENU ÉLECTRONIQUE TOTAL

(Programme d'études 27C/6)

(1982-1986)

1. Introduction

On sait que les valeurs journalières de foF2 varient d'environ 15% à 20% par rapport à la médiane (mensuelle) de foF2 pendant des périodes calmes et aussi pendant des orages magnétiques. Ces variations peuvent se superposer à des augmentations ou des diminutions plus lentes sur plusieurs jours. Il y a intérêt à prévoir toutes ces variations pour assurer des radiocommunications efficaces.

King et Slater [1973] ont souligné la nécessité de prévoir les variations ionosphériques d'un jour à l'autre. Ces auteurs ont montré qu'aux latitudes moyennes, le quartile mensuel des valeurs journalières observées de la foF2, en un point donné et pour une heure locale donnée, est deux fois plus grand en moyenne – et, en été, cinq fois plus grand – que l'erreur sur la valeur médiane correspondante prévue par le Rapport 340. Les diagrammes de Wilkinson [1979] illustrent clairement l'étalement des valeurs de la foF2 pour les stations ionosphériques australiennes entre les latitudes basses et les latitudes élevées. Rush et autres [1974] ont étudié les conséquences de la variabilité journalière de la région F2 sur les circuits en ondes décamétriques, en simulant le fonctionnement de ces circuits par trajectographie.

La prévision des variations journalières dans les régions E et F1 présente peu de difficultés car elles peuvent être représentées par les médianes mensuelles de foE et de foF1 [Rush et Gibbs, 1973].

La méthode fondamentale utilisée pour la prévision à court terme des caractéristiques ionosphériques est une extrapolation d'une série d'observations échelonnées dans le temps, fondée sur l'hypothèse que la tendance actuelle se maintiendra, du moins pendant un avenir rapproché. L'extrapolation peut porter sur la caractéristique ionosphérique elle-même (par exemple foF2), sur un indice dérivé de caractéristiques ionosphériques ou encore sur un paramètre physique dont on sait qu'il présente une corrélation appropriée étroite avec la caractéristique ionosphérique.

On peut effectuer ces prévisions en utilisant des périodes d'anticipation différentes, selon le degré de précision avec lequel les variations ionosphériques doivent être repérées et l'intervalle d'échantillonnage doit être assorti à la période d'anticipation. Par exemple, si des variations notables de l'ionosphère se produisent au cours d'une heure, il faudra faire des observations toutes les cinq à dix minutes et élaborer des prévisions avec des périodes d'anticipation du même ordre.

L'utilité, et les conditions à remplir, d'un réseau d'observatoires ionosphériques installés les uns au sol et les autres à bord de satellites, dont les mesures seraient destinées à la prévision à court terme des conditions de la propagation radioélectrique, ont été décrites en détail par Rush [1976].

2. Prévision à court terme de foF2 et de la MUF d'exploitation

2.1 *Causes des variations à court terme de la MUF*

Les variations à court terme des conditions ionosphériques dues aux éruptions solaires et aux vents solaires très rapides associés aux trous coronaux et dues aux variations du flux ionisant en provenance du Soleil sont étudiées dans le Rapport 727. D'une manière générale, les variations dues aux éruptions solaires et aux trous coronaux débutent à un instant relativement bien défini; on peut les relier au phénomène solaire qui les a provoquées et on peut les prévoir avec un certain succès.

Même pendant les périodes calmes du point de vue magnétique, les caractéristiques ionosphériques présentent d'un jour à l'autre des différences qui sont dues aux variations du flux ionisant des rayons ultraviolets en provenance du Soleil et aux variations de l'intensité du vent solaire ainsi qu'à son interaction avec la magnétosphère et l'ionosphère. L'effet total de ce dernier facteur est très complexe et la chaîne causale complète n'a pas encore été établie. Le premier facteur pose aussi des problèmes insolubles, le flux de rayons ultraviolets ne pouvant être mesuré qu'au prix de grandes difficultés.

S'ajoutant à ces variations, on en observe d'autres dont l'échelle de temps est de l'ordre de 10 min à quelques heures et qui sont dues aux perturbations ionosphériques itinérantes lesquelles représentent les effets sur l'ionosphère des ondes de gravité en atmosphère neutre [Hines, 1974]. On a constaté que les grandes perturbations ionosphériques itinérantes prennent naissance aux latitudes élevées et sont associées à de fortes perturbations géomagnétiques [Francis, 1975; Richmond et Roble, 1979] alors que les perturbations de faible intensité semblent avoir une origine météorologique locale [Bertin et autres, 1978].

Les perturbations ionosphériques itinérantes peuvent modifier la foF2 de 1 à 2 MHz et introduire de multiples composantes Doppler qui donnent lieu à un évanouissement de longue durée et par conséquent à une diminution de la qualité du circuit. Cependant, les effets des perturbations ionosphériques itinérantes peuvent souvent être éliminés par le recours à la diversité d'espace ou de polarisation.

2.2 *Prévisions fondées sur des caractéristiques solaires et géophysiques*

Bennett et Friedland [1970] ainsi que Ichinose et autres [1980] ont établi des prévisions à court terme de la foF2 en rapportant les variations de ce paramètre aux variations correspondantes de variables géophysiques choisies telles que le flux solaire sur 10,7 cm et l'indice géomagnétique K_p. L'inconvénient de ce procédé est qu'il faut commencer par prévoir les variables géophysiques indépendantes dont on suppose que dépendent les variations de la foF2. Même si l'on parvenait à prévoir ces variables avec succès, on ne pourrait établir que des prévisions imparfaites de la foF2 [McNamara, 1976a; Wilkinson, 1979].

La corrélation étroite entre les valeurs moyennes à long terme du flux radioélectrique solaire sur la longueur d'onde 10,7 cm et les paramètres ionosphériques est bien établie, ce qui a conduit à utiliser des indices de prévision ionosphérique basés sur ce flux (Recommandation 371). Bien que cette corrélation laisse penser qu'il est possible d'élaborer un système de prévision à court terme fondé sur la prévision du flux sur 10,7 cm de longueur d'onde, plusieurs jours ou semaines à l'avance, en réalité la corrélation entre le flux sur 10,7 cm et foF2, pour de courts intervalles de temps, est médiocre. Cela est probablement dû au fait que l'ionosphère est ionisée par le flux ultraviolet solaire et que la relation entre les deux flux est mal connue pour de courts intervalles de temps [Hall et autres, 1969; Hall et Hinteregger, 1970].

L'utilisation de moyennes à long terme du flux sur 10,7 cm [McNamara, 1976a; Da Rosa et autres, 1973] a obtenu un certain succès mais, en général, la corrélation entre les valeurs quotidiennes du flux et de foF2 ou du CET n'est pas suffisamment étroite pour fournir des prévisions utiles pour les derniers paramètres.

Zevakina et Lavrora [1980] ont constaté une corrélation entre la direction du champ magnétique interplanétaire et le sens de l'écart de la foF2 par rapport à sa valeur médiane. Les jours où la direction du champ magnétique interplanétaire est celle qui s'éloigne du Soleil, les valeurs de la foF2 aux latitudes élevées et moyennes sont, dans la plupart des cas, supérieures aux valeurs médianes; les jours où le champ magnétique interplanétaire est orienté vers le Soleil, elles leur sont inférieures. La direction de la composante du champ magnétique interplanétaire perpendiculaire à l'écliptique influe aussi sur le sens des écarts de la foF2 par rapport à ses valeurs médianes.

Ces relations entre la direction du champ magnétique interplanétaire et les écarts de la foF2 offrent une possibilité de prévision mais l'on ne dispose généralement pas de mesures en temps réel du champ magnétique interplanétaire et la déduction de la direction de ce champ à partir de magnétogrammes de latitudes élevées [Svalgaard, 1972; Fougere, 1974; Wilcox, 1972] n'est pas toujours correcte.

Kiseliova et Zevakina [1984] ont fait état de succès en reliant les perturbations positives de la foF2 à des modifications des paramètres du vent solaire, de la structure en secteurs du champ magnétique interplanétaire et des indices d'activité géomagnétique. Une revue des récents progrès accomplis par l'URSS en matière de prévision à court terme des perturbations ionosphériques a été préparée par Zevakina [1986].

2.3 *Prévisions fondées sur des caractéristiques ionosphériques*

Une solution plus satisfaisante au problème de la prévision à court terme de la foF2 ou de la MUF d'exploitation d'un circuit donné consiste à établir un plan de prévision fondé sur les valeurs de l'une ou l'autre de ces fréquences observées dans un passé immédiat. De tels plans de prévision pour la foF2 sont par exemple décrits par Rush et Gibbs [1973], Lyakhova et Kostina [1973], McNamara [1976b] et Wilkinson [1979].

Rush et Gibbs [1973] ont utilisé une valeur moyenne pondérée de la foF2 sur 5 jours pour prévoir les valeurs journalières et horaires de cette fréquence. La méthode de Lyakhova et Kostina [1973] est fondée sur la constatation suivante: les coefficients de corrélation entre les écarts de la foF2 par rapport aux valeurs médianes restent supérieurs à 0,5 pendant une durée pouvant atteindre 4 h. La forte corrélation entre les variations de la foF2 d'une heure à l'autre a été étudiée par Lyakhova [1960], Radinov [1963], Gautier et Zacharisen [1965] et Rush [1972].

McNamara [1976b] a établi des prévisions de la foF2 en un point donné avec une durée d'anticipation pouvant atteindre 3 h, en extrapolant la tendance d'écart des observations des quelques dernières heures, par rapport à la médiane glissante sur 15 jours: Wilkinson [1979] a simplement extrapolé dans le temps l'écart d'une valeur observée de foF2 par rapport à la médiane mensuelle prévue. Il a constaté l'efficacité de cette méthode pour des périodes d'anticipation de 3 h environ.

Ames et Egan [1967], Ames et autres [1970], Krause et autres [1970, 1973a et b] et D'Accardi [1978] ont appliqué des méthodes similaires à des circuits à incidence oblique.

Le succès de chacune de ces méthodes de prévision dépend des conditions dans lesquelles on se propose de l'appliquer, surtout en ce qui concerne la précision que l'on recherche et la période d'anticipation dont on a besoin. La plupart d'entre elles donnent des résultats raisonnablement satisfaisants lorsqu'il s'agit de prévoir une MUF d'exploitation plus proche de la valeur réelle que ne l'est la médiane mensuelle prévue, mais seulement pour des périodes d'anticipation de l'ordre d'une heure ou moins.

2.4 *Prévisions fondées sur des indices ionosphériques*

Afin d'établir des prévisions à court terme pour des circuits pour lesquels il n'existe aucune observation en temps réel, on doit déduire le comportement de l'ionosphère des données dont on dispose et utiliser ces observations pour obtenir les valeurs correspondant aux divers points du circuit étudié.

De nombreuses études ont fait état des coefficients de corrélation qui illustrent le degré d'interdépendance des écarts horaires des caractéristiques ionosphériques observées en plusieurs emplacements [Gautier et Zacharisen, 1965; Zacharisen, 1965; Zevakina et autres, 1967a; Rush, 1972].

McNamara [1979] a utilisé les observations de stations ionosphériques peu éloignées pour déterminer un indice ionosphérique effectif qui a ensuite été utilisé avec les cartes synoptiques des médianes mensuelles de la foF2 pour prévoir la valeur de cette fréquence au point de réflexion du circuit étudié.

Des prévisions ont été faites en projetant l'indice dans le temps. On a pris des périodes d'anticipation de 0 à 3 h et de 24 h et on a constaté que les prévisions faites avec une période d'anticipation de 24 h n'étaient en général pas plus inexactes que celles qui étaient faites 0 à 3 h à l'avance. Les erreurs sur les valeurs prévues de la foF2 en deux stations de latitude moyenne étaient inférieures à 10% dans 50 à 70% des cas pour les périodes considérées. Que ce niveau d'erreur soit acceptable dépend de l'application envisagée.

D'autres méthodes plus compliquées, fondées sur la mise à jour en temps réel des cartes synoptiques des caractéristiques ionosphériques, sont décrites par Thompson et Secan [1979] et Tascione et autres [1979]. Un système de prévision fondé sur l'emploi d'indices ionosphériques journaliers a été décrit par Wilkinson [1986].

Dans les limites d'une période d'anticipation nulle, la «prévision» devient en fait une évaluation en temps réel de l'ionosphère.

2.5 *Procédés pratiques pour les prévisions à court et à moyen terme*

Les procédés pratiques pour les prévisions à court et à moyen terme des conditions ionosphériques et des conditions de la propagation radioélectrique sont fondés sur diverses combinaisons des trois méthodes décrites plus haut.

Les prévisions fondées sur des données ionosphériques datant de quelques heures seulement, et destinées à couvrir quelques heures à venir seulement, peuvent tenir compte à la fois des écarts d'un jour à l'autre par rapport aux prévisions à long terme et des écarts dus à une perturbation magnétique en cours, si cette perturbation n'est pas trop forte. Il reste ici une difficulté à surmonter: les écarts varient non seulement en fonction du temps, mais également d'un endroit à un autre au même moment; il faut, par conséquent, faire des observations au voisinage du circuit considéré, ou le long de ce circuit, en incidence verticale ou oblique, ou encore par rétrodiffusion. Une autre méthode consiste à faire des prévisions pour des zones, à l'intérieur desquelles les écarts sont moins grands que d'une zone à l'autre, par exemple la méthode de Zevakina et autres [1967b]. L'étude de Piggott [1970] sur l'utilisation des résultats des sondages en contre-haut pour les prévisions a permis de mettre en évidence les anomalies spatiales, notamment les très grandes différences qui existent entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud. Des techniques avancées de sondage numérique [Bibl et Reinisch, 1978] offrent la possibilité d'identifier et d'interpréter des conditions ionosphériques complexes en temps quasi réel [Reinisch et Huang, 1982; Wright et Pitteway, 1982]. Un réseau mondial de ce type d'ionosondes [Wright, 1981], sondant obliquement et verticalement, pourrait fournir un système de prévision pour tout le globe.

La méthode allemande de la Deutsche Bundespost est fondée sur l'enregistrement continu des données relevées sur 20 circuits radioélectriques européens et extraeuropéens, en plus des méthodes de prévision de l'activité solaire et des perturbations magnétiques déjà décrites. Toutes les 24 heures, on établit les pourcentages d'écart par rapport aux prévisions, en fonction des événements solaires et géographiques actuels et en fonction des conditions qui existaient au même stade des rotations solaires précédentes. Comme les prévisions portent principalement sur des circuits faisant déjà l'objet de surveillance, on élimine ainsi l'influence des anomalies spatiales, et la méthode est entachée des mêmes incertitudes que les méthodes mentionnées précédemment. La méthode de la Deutsche Bundespost constitue une extrapolation des procédés plus anciens décrits par Ochs [1970]. Une méthode de prévision fondée sur des données solaires et géophysiques et sur les champs mesurés en temps réel d'émetteurs à ondes décamétriques éloignés fonctionnant sur 26 fréquences a été décrite par Dambolt [1979]. La particularité de cette méthode est que les prévisions se présentent sous forme d'un indice de qualité qui est en relation avec le champ journalier attendu.

Quelques méthodes de prévision sont basées sur des modèles particuliers. Par exemple, le modèle de Obayashi et Matuura [1972] qui décrit la distribution des variations de la densité électronique avec la hauteur, la latitude et la saison durant la phase moyenne d'un orage magnétique a été utilisé par Barclay [1976].

Dans la méthode de prévision à court terme décrite par Barclay [1976], on compare les valeurs horaires de foF2 fournies par deux stations d'Europe occidentale avec les valeurs prévues correspondantes. On fait ensuite la prévision des MUF d'exploitation: celles-ci sont considérées comme basses pour la période à venir s'il existe une perturbation magnétique ayant un niveau supérieur à une valeur donnée; dans le cas contraire, les MUF sont considérées comme normales, sauf si le nombre de taches solaires et le flux radioélectrique ont des valeurs très différentes des valeurs prévues. On fait aussi la prévision des LUF: celles-ci sont considérées comme élevées en hiver si l'activité magnétique est forte; elles sont considérées comme élevées ou basses, ici encore, selon les écarts accusés par les nombres de taches solaires et les niveaux du flux radioélectrique. Cette façon de procéder permet à des personnes non expérimentées de faire des prévisions d'une certaine utilité, notamment pendant les périodes calmes.

En URSS, des études statistiques portant sur les variations de foF2 ont mis en évidence des intervalles de temps «interdits» pour les débuts des orages, pour les stations ionosphériques de ce pays [URSS, 1957]. En URSS également, on a pu prévoir, en effectuant une surveillance en temps réel, des communications relativement stables dans la zone aurorale; on a observé en effet que foF2 ne subit pas de fluctuations importantes pendant des périodes de 15 à 30 minutes lorsque les réflexions s'effectuent sur la couche F2. Aux Etats-Unis d'Amérique, on a étudié, pour toutes les stations et pour certains mois de 1958, les écarts de la valeur journalière de foF2 par rapport à la médiane mensuelle calculée. On a observé des tendances systématiques mondiales de ces écarts, notamment en période de perturbations ionosphériques [Jones et autres, 1973]. Zevakina [1985] passe en revue les principaux progrès accomplis en URSS en matière de prévision à court terme des perturbations ionosphériques.

La méthode de prévision à moyen terme (une semaine à l'avance) utilisée par l'Administration française fait appel à des modèles mathématiques établis par application de la théorie des systèmes, des modèles et de leur identification [Le Roux, 1980]. De par leurs performances, ces modèles, qui prennent en compte les indices géomagnétiques Ak et solaires Φ, permettent d'établir la prévision hebdomadaire des MUF de référence horaires pour diverses régions géographiques. Des messages hebdomadaires donnent pour la semaine suivante des pourcentages d'écart des MUF de référence par rapport aux prévisions mensuelles publiées antérieurement. Une prévision journalière des niveaux prévus de la MUF et de la LUF pour les prochaines 24 heures, divisées en période de 6 heures, est aussi faite pour une zone de l'Europe septentrionale et pour une zone d'Europe sur la base d'observations effectuées à Uppsala et à Lannion [Bourdila et autres, 1984].

3. Prévision à court terme du contenu électronique total (CET)

Le problème général de la prévision des effets transionosphériques sur les ondes radioélectriques a fait l'objet d'un rapport dans les Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Klobuchar, 1979]. Ce problème est également étudié dans le Rapport 263.

Les moyennes mensuelles du contenu électronique total (CET) sont normalement obtenues à partir de profils de densité électronique établis d'après des modèles de la foF2 et de la M(3000)F2 [Jones et autres, 1969; Jones et Obitts, 1970]. Ces prévisions comportent donc les erreurs inhérentes à ces deux modèles empiriques.

Des comparaisons entre les médianes observées et prévues du CET dans des stations de latitudes moyennes et basses [McNamara et Wilkinson, 1983; McNamara, 1984] ont montré qu'une erreur de 10% n'est pas inhabituelle aux latitudes moyennes et qu'une erreur de 20 à 30% se produit souvent aux latitudes basses.

La variabilité à court terme du CET par rapport aux moyennes mensuelles est d'environ 25% en valeur moyenne quadratique et elle suit une distribution quasi normale [Johanson et autres, 1978; Soicher et autres, 1982]. Aux latitudes moyennes, cela correspond à plusieurs fois l'erreur sur les valeurs médianes prévues.

3.1 *Effets des orages géomagnétiques sur le CET*

Les variations du CET par rapport aux conditions moyennes sont principalement dues à l'activité géomagnétique associée à des phénomènes solaires. Cette question est traitée dans le Rapport 727.

3.2 *Recours à des mesures du CET en temps quasi réel pour améliorer les prévisions à court terme*

Les valeurs du retard moyen mensuel, même corrigées pour tenir compte des variations moyennes du CET dues aux effets des orages magnétiques, peuvent ne pas être suffisamment précises pour certains systèmes ou certaines catégories d'utilisateurs de systèmes. Pour la mise à jour des modèles médians, il y aurait plutôt lieu d'effectuer des mesures en temps quasi réel de l'ionosphère locale, qui porteraient soit sur la foF2 soit sur le contenu électronique total. Il conviendrait aussi d'envisager une autre solution qui consiste à utiliser deux fréquences très espacées pour mesurer et corriger en temps réel l'erreur sur le retard ionosphérique de premier ordre. Les techniques de mise à jour impliquent l'établissement de médianes mensuelles ou hebdomadaires améliorées, qui serviraient de base à la prévision des valeurs pour les prochaines heures.

Des études de techniques adaptatives qui utilisent des observations en temps réel afin de réduire les erreurs de prévision (moyenne quadratique mensuelle) ont été effectuées à partir de données sur la foF2 [Wilkinson, 1979] et sur le CET [Donatelli et Allen, 1978, 1981; Leitinger et autres, 1978]. Pour que l'on puisse réduire sensiblement (c'est-à-dire d'environ 50%) l'erreur résiduelle quand on utilise des observations faites en un même lieu, il faut que les intervalles de prévision soient inférieurs aux valeurs suivantes:

- en période d'activité solaire maximale
  - de jour: 3 h
  - de nuit: 1 h
- en période d'activité solaire minimale
  - de jour: 1 h
  - de nuit: 30 min.

Les intervalles à respecter pour une mise à jour utile en période d'activité solaire minimale doivent être plus courts pour obtenir le même pourcentage de réduction. L'erreur résiduelle est beaucoup plus faible pendant de telles périodes.

3.3 *Projections spatiales des mesures en temps quasi réel*

La projection spatiale des observations a été examinée dans des études de corrélation portant sur la foF2 [Rush, 1976] et sur le CET [Klobuchar et Johanson, 1977; Soicher, 1978, 1979]. Les travaux de Klobuchar et Johanson [1977] montrent l'existence d'une distance de corrélation en latitude à peu près égale à la moitié de la distance de corrélation en longitude. Ce fait doit être pris en considération en même temps que les effets temporels de toute technique adaptative dans laquelle on se sert d'observations en temps réel pour la mise à jour des données en un emplacement autre que le point d'observation. On a procédé à un tel examen en utilisant des données relatives au CET relevées dans des stations de latitudes moyennes [Allen et autres, 1977]. L'accroissement du taux d'augmentation des erreurs représente une superposition des fluctuations spatiales et temporelles. En ramenant l'intervalle espace-temps à un intervalle de temps équivalent, on peut avoir une estimation de l'intervalle de mise à jour utile. Pour les stations de latitudes moyennes, une bonne approximation peut être obtenue au moyen de la formule [Klobuchar, 1979]:

$$\Delta ET = \frac{1}{15}\left[(\Delta LON)^2 + (2\Delta LAT)^2\right]^{\frac{1}{2}} + \left\{\begin{array}{c} \Delta T \\ \text{ou} \\ |\Delta T - \Delta LT| \end{array}\right\} \qquad (1)$$

dans laquelle:

ΔLON: différence de longitude, (degrés)

ΔLAT: différence de latitude, (degrés)

ΔT: intervalle de temps entre l'observation et la mise à jour (heures)

ΔLT: $\Delta LON/15$, (heures)

ΔET: intervalle de temps équivalent, (heures)

$\{\}$: choix entre la direction est ou ouest du point d'observation au point de mise à jour; on prend ΔT si on va de l'ouest vers l'est et $|\Delta T - \Delta LT|$ si on va de l'est vers l'ouest.

4. Prévision d'autres paramètres

La prévision à court terme de la MUF d'exploitation sur un circuit est généralement la seule qui soit nécessaire pour les circuits téléphoniques et les circuits télégraphiques à débit réduit. Pour les liaisons de données à débit binaire moyen, d'autres paramètres, tels que les périodes d'évanouissement et l'étalement de fréquence par effet Doppler, deviennent importants, étant donné leur influence sur le taux d'erreur. La prévision à court terme de ces paramètres est certes possible, mais il est généralement admis que la gestion des fréquences en temps réel est indispensable à l'exploitation des liaisons de données à débit moyen [Clarke, 1979]. L'ionisation sporadique de la couche E est particulièrement importante à cet égard car, si elle ne peut faire l'objet de prévisions satisfaisantes, elle peut par contre assurer des communications de haute stabilité.

En raison du caractère très variable de l'apparition et de l'intensité de l'ionisation E sporadique, ses prévisions devraient être établies sous une forme statistique.

Harnischmacher et Rawer [1970] ont évoqué la possibilité de prévoir les «ouvertures» E sporadique, sur la base de la mesure de vents dans la région E; ils décrivent une série de mesures de Es apparaissant jour après jour à la même heure locale plus une heure par jour, l'absorption se trouvant accrue à la fin de cette séquence. Zevakina et autres [1967a] tiennent compte des variations saisonnières de Es dans le Manuel de l'URSS.

Une étude effectuée en Amérique du Sud par Giráldez et Mesterman [1973] pour un cycle solaire a montré que l'apparition de E sporadique pendant la journée dépend de la hauteur virtuelle de E sporadique au lever du Soleil.

Il semble que les conditions qui règnent dans la magnétosphère (densité et température électroniques) soient les facteurs dont dépendent essentiellement la configuration des champs électriques et de la concentration des particules. Dans ces conditions, le moyen le plus efficace pour prévoir l'ionisation E sporadique aurorale pourrait bien être l'emploi de satellites servant à étudier la magnétosphère.

L'ionosphère aux latitudes élevées pose des problèmes particuliers en raison de sa variabilité et de sa complexité (voir le Rapport 886). Besprozvannaya et autres [1979] estiment que les méthodes utilisées pour la prévision aux latitudes moyennes ne conviennent pas aux latitudes élevées et qu'il serait préférable d'utiliser une méthode fondée sur le contrôle des caractéristiques à grande échelle de la distribution de l'ionisation, qui soient les projections sur la haute ionosphère des caractéristiques structurelles à grande échelle du plasma magnétosphérique. Cela pourrait se faire grâce à des ionosondes au sol disposées à des emplacements appropriés, ou grâce à des satellites.

On peut faire des mesures en temps réel du creux de latitude élevée et de ses effets sur les communications en utilisant par exemple des photographies aurorales DMSP (Defense Meteorological Satellite Programme) pour localiser le bord du creux situé du côté du Pôle et en se servant ensuite du modèle de creux décrit par Halcrow et Nisbet [1977].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E., HARTMANN, G. K. et LEITINGER, R. [1977] Adaptive mapping of mid-latitude ionosphere. AFGL-TR-77-0176, Air Force geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

AMES, J. W. et EGAN, R. D. [1967] Digital recording and short-term prediction of oblique ionospheric propagation, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, **3**, 382-389.

AMES, J. W., EGAN, R. D. et McGINTIE, G. F. [1970] Short-term prediction of HF communication circuit performance. *Ionospheric Forecasting.* Ed. V. Agy. AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 22.

BARCLAY, L. W. [1976] An ionospheric storm model used for forecasting. AGARD Conf. Proc., 173. Radio Systems and the Ionosphere, Athènes, Grèce.

BENNETT, S. M. et FRIEDLAN, A. B. [1970] Prediction of daily fluctuation of the F-region plasma frequency. *Ionospheric forecasting.* Ed. V. Agy. AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 31.

BERTIN, F., TESTUD, J., KERSLEY, L. et REES, P. R. [1978] The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere: an experimental study. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 1161-1184.

BESPROZVANNAYA, A. S., SHIROCHKOV, A. V. et SHOHUKA, T. I. [1979] On the approach to forecasting ionospheric problems. *STPP**, Vol. II, 528-542.

BIBL, K. et REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.

BOURDILA, A. M., FLEURY, R. et LE ROUX, Y. M. [1984] Short-term radio propagation predictions in the HF range. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.

CLARKE, R. H. [1979] Influence of ionospheric irregularities on HF skywave communications. *Abstracts of the Sydney Ionospheric Propagation Conference of May 14-17, 1979.* Eds D. G. Cole and L. F. McNamara. Ionospheric Prediction Service Series X Reports IPS-X9, Sydney, Australie.

D'ACCARDI, R. J. [1978] Time-series modelling and analysis of high frequency (HF) vertical and short-path oblique incidence ionospheric soundings. US Army Communications R&D Command Research and Development Tech. Rep. CORADCOM 78-7, NTIS Accession N° AD A058 630. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

DAMBOLDT, T. [1979] HF short-term field strength predictions and their agreement with observations. AGARD Conf. Proc. No. 238, Vol. 1, *Operational Modelling of the Aerospace Propagation Environment.* Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N79-18094. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

DA ROSA, A. V., WALDMAN, H., BENDITO, J. et GARRIOTT, O. K. [1973] Response of the ionospheric electron content to fluctuations in solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1429-1442.

DONATELLI, D. E. et ALLEN, R. S. [1978] Temporal variability of ionospheric refraction correction. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 490-496. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Stock N° 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.

DONATELLI, D. E. et ALLEN, R. S. [1981] Time cells for adaptive prediction of total electron content. *Radio Sci.*, Vol. 16, **2**, 261-270.

FOUGERE, P. F. [1974] Dependence of inferred magnetic sector structure upon geomagnetic and solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 22, **8**, 1173-1184.

FRANCIS, S. [1975] Global properties of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1011-1054.

GAUTIER, T. N. et ZACHARISEN, D. H. [1965] Use of space and time correlation in short-term ionospheric predictions. Conference Record First IEEE Annual Communications Convention, 7-9 juin, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, 671-676.

GIRALDEZ, A. E. et MESTERMAN, I. [1973] Procesos físicos y guías para las predicciones de la Es (en espagnol). LIARA Rapport C-21, Laboratorio Ionosférico de la Armada, República Argentina.

HALCROW, B. W. et NISBET, J. S. [1977] A model of F2 peak electron densities in the main through of the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 12, **5**, 815-820.

HALL, L. A., HIGGINS, J. E., CHAGNON, C. W. et HINTEREGGER, H. E. [1969] Solar cycle variation of extreme ultraviolet radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 4181-4183.

HALL, L. A. et HINTEREGGER, H. E. [1970] Solar radiation in the extreme ultraviolet and its variation with solar rotation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6959-6965.

HARNISCHMACHER, E. et RAWER, K. [1970] Precursor events for possible forecasting of sporadic-E increased absorption. *Ionospheric Forecasting.* E. V. Agy, AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 32.

HINES, C. O. [1974] *The Upper Atmosphere in Motion.* American Geophysical Union, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.

ICHINOSE, M., MAEDA, R. et ITO, S. [1980] Short-term prediction of maximum usable frequency for radio communications over the Japan area. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 27, **124**, 179-185.

* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly (voir Donnelly, 1979 et 1980 dans la bibliographie).

JOHANSON, J. M., BUONSANTO, M. J. et KLOBUCHAR, J. A. [1978] The variability of Ionospheric time delay. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 479-485. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Stock No. 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.

JONES, W. B., GALLET, R. M., LEFTIN, M. et STEWART, F. G. [1973] Analysis and representation of the daily departures of the foF2 from the monthly median. Office of Telecommunications, Report 73-12, US Dept. of Commerce, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

JONES, W. B., GRAHAM, R. P. et LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Technical Report ERL 107-ITS-75, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

JONES, W. B. et OBITTS, D. L. [1970] Global representation and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecomm. Res. Rep. OT/ITS/TRR3. Office of Telecommunications, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

KING, J. W. et SLATER, A. J. [1973] Erreurs dans la prévision des valeurs de foF2 et hmF2 par rapport aux valeurs journalières observées. *J. des Télécomm*, Vol. 40, 766-770.

KISELIOVA, M. V. et ZEVAKINA, R. A. [1985] Forecasting of positive ionospheric disturbances. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.

KLOBUCHAR, J. A. [1979] Transionospheric propagation predictions. *STPP*, Vol. II, 213-245.

KLOBUCHAR, J. A. et JOHANSON, J. M. [1977] Correlation distance of mean daytime electron content. AFGL-TR-77-0185, DCA ADA 048117. Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1970] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (60 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-3345.

KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1973a] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (200 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4144.

KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1973b] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (500 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4145.

LEITINGER, R., ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E. et HARTMANN, G. K. [1978] Adaptive mapping of ionospheric features. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 530-537. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

LE ROUX, Y. M. [1980] Prévisions ionosphériques à court terme par modélisation mathématique prédictive. *Ann. de Géophys.*, Vol. 36, 251-261.

LYAKHOVA, L. N. [1960] Short-range forecasting of the state of the ionosphere. *Trudy IZMIRAN*, **17**, 240-281.

LYAKHOVA, L. N. et KOSTINA, L. I. [1973] On quantitative ionospheric forecasting, *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 13, **1**, 50-53.

McNAMARA, L. F. [1976a] The correlation of individual values of foF2 and M(3000)F2 with the solar 10.7 cm flux under magnetically quied conditions, Ionospheric prediction service Series R Reports, IPS-R30, Sydney, Australie.

McNAMARA, L. F. [1976b] Short-term forecasting of foF2. Ionospheric Prediction Service Series R Reports, IPS-R33, Sydney, Australie.

McNAMARA, L. F. [1979] The use of ionospheric indices to make real- and near-real-time predictions of foF2 around Australia. *STPP*, Vol. I, 249-258.

McNAMARA, L. F. [1984] Prediction of total electron content using international reference ionosphere. *Adv. Space Res.*, **4**, 25-50.

McNAMARA, L. F. et WILKINSON, P. J. [1983] Prediction of total electron content using the international reference ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 169-174.

OBAYASHI, T. et MATUURA, N. [1972] Theoretical model of F-region storm. *Solar-terrestrial Physics.*, 1970, Part IV, 199-211.

OCHS, A. [1970] The forecasting system of the Fernmeldetechnisches Zentralamt. AGARD Conf. Proc. No. 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 43. Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PIGGOTT, W. R. [1970] The use of satellite data for prediction purposes. AGARD Conf. Proc. No. 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 19, Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

RADINOV, Ya. S. [1963] Autocorrelative characteristics of critical frequency and ionization-density fluctuations. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 985-990.

REINISCH, B. W. et HUANG, X. [1982] Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, Vol. 17, 837-844.

RICHMOND, A. D. et ROBLE, R. G. [1979] Dynamic effects of aurora-generated gravity waves on the mid-latitude ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 41, 7-8, 841-852.

RUSH, C. M. [1972] Improvements in ionospheric forecasting capability. Report AFCRL-72-0138. Air Force Cambridge Research Labs, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

RUSH, C. M. [1976] Un réseau des stations d'observation de l'ionosphère destiné aux prévisions à court terme de la propagation. *J. des Télécomm.*, Vol. 43, 544-548.

RUSH, C. M. et GIBBS, J. [1973] Predicting the day-to-day variability of the mid-latitude ionosphere for application to HF propagation predictions. Rep. AFCRL-TR-73-0335. Air Force Cambridge Research Labs, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique. Air Force Surveys in Geophysics, N° 268.

RUSH, C. M., MILLER, D. et GIBBS, J. [1974] The relative daily variability of foF2 and hmF2 and their implications of HF radio propagation. *Radio Sci.*, Vol. 9, 749-756.

SOICHER, H. [1978] Spatial correlation of transionospheric signal time delays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-26, 311-314.

SOICHER, H. [1979] Correlation of satellite signal time delays at widely separated locations. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 888-890.

SOICHER, H., HOUMINER, Z. et SHUVAL, A. [1982] Total electron content structure in the Middle East. *Radio Sci.*, Vol. 17, 1623-1631.

SVALGAARD, L. [1972] Interplanetary magnetic-sector structure 1926-1971. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 4027-4034.

TASCIONE, T. F., FLATTERY, T. W., PATTERSON, V. G., SEGAN, J. A. et TAYLOR, J. W. Jr. [1979] Ionospheric modeling at Air Force Global Weather Central. *STPP*, Vol. I, 367-377.

THOMPSON, R. L. et SECAN, J. A. [1979] Geophysical forecasting at AFGWC. *STPP*, Vol. I, 350-366.

URSS [1957] Annales de la Conférence corpusculaire de l'Académie des Sciences d'URSS (en russe), Moscou, URSS.

WILCOX, J. M. [1972] Inferring the interplanetary magnetic field by observing the polar geomagnetic field. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, 1003-1014.

WILKINSON, P. J. [1979] Prediction limits for foF2. *STPP*, Vol. I, 259-278.

WILKINSON, P. J. [1986] Short-term forecasting using daily ionospheric indices. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 509, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

WRIGHT, J. W. [1981] Global real-time ionospheric monitoring. *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems.* Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Library of Congress, Catalog No. 82-600510.

WRIGTH, J. W. et PITTEWAY, M. L. [1982] Application of dopplionograms and goniogram to atmospheric gravity wave disturbances in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 1719.

ZACHARISEN, D. H. [1965] Space-time correlation coefficients for use in short-term ionospheric predictions. NBS Report 8811. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

ZEVAKINA, R. A. [1986] Development of short-term ionospheric predictions. A review. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 519, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

ZEVAKINA, R. A. et LAVROVA, E. V. [1980] On the possibility of predicting variations in the F2-region parameters as a function of the IMF direction. *STPP*, Vol. IV, C-27 à C-36.

ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1967a] Manual on short-term prediction of ionospheric geomagnetic storms and radio-propagation forecasting service. Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1967b] *Principes pour la Prévision des Perturbations Ionosphériques et Magnétiques* (en russe). Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

BIBLIOGRAPHIE

DONNELLY, R. F. Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:

Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.

Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.

Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.

Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.

TCHERNOV, Y. A. [1971] *Sondages ionosphériques par rétrodiffusion* (en russe). Sviaz, Moscou, URSS.

RAPPORT 1012

MODÉLISATION, POUR L'EXPLOITATION, DES CONDITIONS DE PROPAGATION DES ONDES DÉCAMÉTRIQUES AUX LATITUDES ÉLEVÉES

(Question 27/6)

(1986)

1. Introduction

Les radiocommunications à ondes décamétriques aux latitudes élevées sont un sujet d'étude très délicat et leurs applications pratiques se heurtent encore à des difficultés. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est possible de faire des prévisions à long terme pour les radiocommunications à ondes décamétriques, ainsi que des ébauches de spécifications en temps réel de l'ionosphère aux latitudes élevées. Nous sommes capables de faire des prévisions à court terme pour les radiocommunications à ondes décamétriques, dans la mesure où nous pouvons extrapoler dans le temps la morphologie observée. Les propriétés particulières à l'ionosphère aux latitudes élevées affectant les radiocommunications sont exposées dans le Rapport 886. D'autres articles consacrés à l'ionosphère aux latitudes élevées et aux prévisions de ses propriétés ont été publiés dans les Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Donnelly, 1979, 1980] et dans un numéro spécial de Radio Science [Hunsucker et Greenwald, 1983]; voir, par exemple, ceux de Besprozvannaia et autres [1979], d'Hunsucker [1979a, b] et de Vondrak [1979].

2. Modèles d'ionosphère aux latitudes élevées

Pour prévoir la propagation des ondes décamétriques aux latitudes élevées, il faut disposer d'un modèle des distributions spatiale et temporelle de la densité électronique dans l'ionosphère à ces latitudes. Etant donné la structure spatiale très particulière de l'ionosphère dans la région aurorale et la calotte polaire, les prévisions relatives à la propagation peuvent dépendre étroitement de la position des structures et de leurs changements dynamiques.

Parmi les caractéristiques de l'ionosphère aux latitudes élevées qu'il faut modéliser pour les prévisions de propagation des ondes décamétriques, Hunsucker [1979b] cite les suivantes:

a) emplacement et extension de l'ovale auroral en fonction de l'activité magnétique,
b) caractéristiques des régions E et F dans l'ovale auroral, dans le creux aux latitudes moyennes, dans le cornet diurne et dans la calotte polaire,
c) profil de N_e en fonction de la hauteur, entre les régions E et F2 (ce profil est important également pour la prévision de la propagation guidée),
d) absorption aurorale, absorption dans la calotte polaire (effets intéressant la région D),
e) irrégularités des régions E et F auxquelles sont dus la propagation diffuse par trajets multiples (F diffus), les évanouissements rapides (papillotement) et la propagation en dehors du grand cercle.

Pour les prévisions de la propagation ionosphérique en ondes décamétriques, le profil et les forts gradients de l'ionosphère de haute latitude doivent être représentés dans leurs trois dimensions. Des prévisions de MUF et de LUF mettant en jeu de la triangulation, la définition des modes de propagation et l'emplacement des points de réflexion peuvent présenter un intérêt limité, car de forts gradients horizontaux modifient sérieusement la géométrie du bond et les estimations de l'absorption.

Les possibilités actuelles en matière de prévision de propagation des ondes décamétriques aux latitudes élevées sont de nature statistique; on se sert de données synoptiques dans lesquelles il n'est pas tenu compte de la structure à petite échelle (moins de 100 km) ni des phénomènes transitoires (d'une durée inférieure à 3 h). Cela revient à dire que des phénomènes importants, comme les arcs auroraux et les sous-orages, sont totalement négligés. Certains modèles tiennent compte de la couche E aurorale, de Es aurorale, de l'absorption aurorale et des régions F1 et F2. Les modèles incorporés dans les programmes d'ordinateur pour la prévision de la propagation des ondes décamétriques n'ont, pour la plus grande partie, pas été vérifiés par des données mesurées sur des trajets obliques.

2.1 *Modèles dont on dispose pour les prévisions*

Hunsucker [1979b] a passé en revue les modèles ionosphériques pour les latitudes élevées dont on dispose pour faire des prévisions. Il existe plusieurs modèles qui tiennent compte des caractéritiques énumérées plus haut. On s'est servi des données rassemblées au moyen d'ionosondes au sol ou aéroportées pour mettre au point un modèle amélioré [Elkins et Rush, 1973]. Ultérieurement, ce modèle a encore été modifié en utilisant les données du sondeur à diffusion incohérente [Vondrak et autres, 1977]. Le nouveau modèle emploie, pour foF2 et hmF2, les mêmes valeurs que le modèle polaire antérieur [Elkins et Rush, 1973] et comporte une couche E aurorale (essentiellement équivalente à une couche Es occultante), une vallée dans le profil déterminé à partir des données du sondeur à diffusion et un modèle d'absorption qui dépend de l'activité magnétique.

L'URSS a mis au point des modèles statistiques de la structure de l'ionosphère aux latitudes élevées [Kovalevskaya et Joulina, 1979; Avdiouchine et autres, 1979]. On a constaté des différences entre les prévisions soviétiques et américaines pour l'absorption aurorale et la foF2 dans le creux de latitude moyenne en période d'activité solaire maximale. Pendant les perturbations magnétiques, les soviétiques ont identifié trois régions distinctes d'absorption aurorale, alors que le modèle d'absorption proposé par Vondrak et autres [1977] comporte deux régions d'absorption renforcée en temps et en latitude. Les deux modèles donnent aussi une description différente des gradients de foF2 dans le creux en période d'activité solaire maximale [Miller et Gibbs, 1975].

Foppiano et Bradley [1983] ont mis au point une méthode de prévision de l'intensité de l'absorption aurorale, que le CCIR utilise dans la méthode d'évaluation du champ pour les ondes décamétriques (voir le Supplément au Rapport 252). On a constaté que la distribution statistique quotidienne de l'absorption est log-normale et l'on peut déterminer la probabilité pour qu'un niveau donné soit dépassé si l'on connaît deux paramètres: l'absorption médiane et la probabilité de dépassement du niveau de 1 dB. Foppiano et Bradley [1984] ont étudié les variations statistiques des données d'absorption mesurées avec un riomètre différents jours et à une heure donnée. Une nouvelle relation approximative a été établie entre A_m et Q_1 et la famille de courbes de distribution d'amplitude compatible avec cette relation a été présentée. Les résultats obtenus avec cette relation et ceux obtenus lors de travaux antérieurs ont été comparés. Les variations géographiques, diurnes, saisonnières et celles liées au cycle solaire ont aussi été prises en compte [Foppiano et Bradley, 1985]. Une méthode de prévision de l'intensité de l'absorption aurorale a été mise au point par Joulina et autres [1983]. Elle aussi est fondée sur un modèle empirique de distribution de probabilité de l'intensité de l'absorption aurorale déduite d'observations du bruit cosmique radioélectrique effectuées à l'aide de riomètres situés dans la partie eurasienne de l'hémisphère nord. Dans cette méthode, les variations de l'absorption aurorale en fonction de l'espace et du temps sont présentées sous forme de cartes et de tableaux [CCIR, 1982-86a, b]. Une approximation analytique de ces variations de l'absorption aurorale est donnée dans [CCIR, 1982-86c].

Un modèle comportant une classification grossière de $N(h)$ dans la région F pour les diverses structures (creux, ovale, etc.) ainsi que des renseignements plutôt qualitatifs au sujet des effets des régions D et E sur la propagation des ondes décamétriques a été utilisé [Rush et autres, 1982] pour modifier des modèles ionosphériques médians mensuels, pour spécifier les conditions de propagation des ondes décamétriques et pour faire des prévisions.

L'utilisation de modèles théoriques peut aider à mieux comprendre la chaîne des événements qui relient l'activité solaire aux modifications de l'ionosphère aux latitudes élevées et ses effets sur les radiocommunications à ondes décamétriques. Des schémas généraux pour la spécification et la prévision du vent solaire, de la magnétosphère, du champ géomagnétique et de l'ionosphère aux latitudes élevées ont été élaborés [Akasofu, 1981, 1982, 1983; Hakamada et Akasofu, 1982]. Des modèles théoriques de l'ionosphère aux latitudes élevées permettent de reproduire de façon satisfaisante un grand nombre des caractéristiques observées [Watkins, 1978; Sojka et autres, 1982], telles que le «creux principal», le «trou d'ionisation», la «langue d'ionisation», les «crêtes d'ionisation qui se produisent à l'occasion des aurores» et les «effets UT».

2.2 *Spécification en temps réel*

Pour optimiser les performances des systèmes de radiocommunications et des radars à ondes décamétriques, on doit disposer d'une spécification en temps réel des principales caractéristiques aurorales et polaires telles que les arcs, le creux de latitude moyenne et le cornet polaire. Des satellites placés sur une orbite polaire très inclinée peuvent examiner en temps réel les régions polaires et aurorales sur plusieurs longueurs d'ondes optiques. La méthode du tracé des rayons en temps quasi réel permettrait de prévoir des paramètres de la propagation des ondes décamétriques, tels que la disponibilité des modes, la dispersion, les modes multiples et la propagation en dehors du grand cercle.

2.3 *Prévision à court terme*

Pour améliorer les programmes de prévision actuels, on pourrait utiliser des paramètres du vent solaire (vitesse, densité et champ magnétique interplanétaire) mesurés par des engins spatiaux afin de prévoir les caractéristiques de l'ovale auroral, l'apport total d'énergie de la magnétosphère et la morphologie des systèmes de courants [Vondrak, 1979]. Des satellites à haute altitude, fournissant en temps réel des images mondiales de la réaction de l'ionosphère à l'arrivée de particules provenant de la magnétosphère, faciliteraient grandement la prévision des modifications de détail de la structure, de la dimension et de l'emplacement des régions de l'ionosphère où la densité électronique est renforcée. Le sondeur à diffusion incohérente de Sondre Stromfjord au Groenland fournit des renseignements supplémentaires sur l'ionosphère aux latitudes élevées (ovale auroral, cornet et calotte polaire) entre 69 et 81° de latitude magnétique invariante [Kelly, 1983].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKASOFU, S.-I. [1981] Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, Vol. 28, 121.

AKASOFU, S.-I. [1982] Prediction of development of geomagnetic storms by using the solar wind-magnetosphere energy coupling function, ε. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 29, 1151.

AKASOFU, S.-I. [1983] Energy flow and dynamical coupling in the solar wind-magnetosphere-ionosphere system. *Radio Sci.*, Vol. 18, 971-980.

AVDIOUCHINE, S. I., DANILOV, A. D., MALICHEV, A. B., NOVIKOVA, G. N. et SVIDSKY, P. M. [1979] Forecasting ionospheric and geomagnetic conditions in the forecasting center of IAG. *STPP**, Vol. I, 104.

BESPROZVANNAIA, A. S., CHIROTCHOV, A. V. et CHTCHOUKA, T. I. [1979] On the approach to forecasting polar ionospheric conditions. *STPP*, Vol. II, 528.

DONNELLY, R. F. Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:

Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.

Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.

Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.

Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.

ELKINS, T. et RUSH, C. [1973] A statistical predictive model of the polar ionosphere. *An Empirical Model of the Polar Ionosphere.* Ed. T. Elkins. AFCRL-TR-73-0331. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [octobre 1983] Prévision de l'absorption aurorale des ondes décamétriques à incidence oblique. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, **X**, 547-560.

FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [1984] Day-to-day variability of riometer absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 46, 689-696.

FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [1985] Morphology of background auroral absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 47, 663-674.

HAKAMADA, K. et AKASOFU, S. I. [1982] Simulation of three dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms. *Space Sci. Revs.*, Vol. 31, **3**.

HUNSUCKER, R. D. [1979a] Morphology and phenomenology of the high latitude E and F regions. *STPP*, Vol. II, 543.

HUNSUCKER, R. D. [1979b] High latitude E and F region ionosphere predictions. *STPP*, Vol. II, 513.

HUNSUCKER, R. D. et GREENWALD, R. A. (Guest Eds.) [1983] Including special papers: radio probing of the high-latitude ionosphere and atmosphere: new techniques and new results. *Radio Sci.*, Vol. 18, **6**.

JOULINA, E. M., KISHCHA, P. V., LUKASHKIN, V. M. et SHIROCHKOV, A. V. [1983] Pertes d'énergie supplémentaires sur des liaisons radioélectriques de haute latitude (en russe), 208, Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

KELLY, J. D. [1983] Sondrestrom radar – initial results. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 10, 1112-1115.

KOVALEVSKAYA, E. M. et JOULINA, E. M. [1979] The statistical properties of the disturbed high latitude ionosphere in radio wave propagation computations. *STPP*, Vol. III, D2-16.

MILLER, D. C. et GIBBS, J. [1975] Ionospheric analysis and modeling. Scientific Report 2, AFCRL-TR-75-0549. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

RUSH, C. M., ROSICH, R. K., BROOKS, C. B., LEISE, D. L. et POKEMPNER, M. [1982] A simplified model of the high latitude ionosphere for telecommunications purposes. NTIA Report 82-94. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

SOJKA, J. J., SCHUNK, R. W. et RAITT, W. J. [1982] Seasonal variations of the high latitude F region for strong convection. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 187.

VONDRAK, R. R. [1979] Ionospheric predictions, magnetosphere-ionosphere interactions. *STPP*, Vol. II, 476.

VONDRAK, R., SMITH, G., HATFIELD, V., TSUNODA, R., FRANK, V. et PERREAULT, P. [1977] Chatanika model of the high-latitude ionosphere for application to HF propagation prediction. RADC-TR-78-7. Rome Air Development Center, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

WATKINS, B. [1978] A numerical computer investigation of the polar F region ionosphere. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 26, 559.

Documents du CCIR

[1982-86]: **a.** 6/48 (URSS); **b.** 6/49 (URSS); **c.** 6/194 (URSS).

---

* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly (voir [Donnelly, 1979, 1980]).

RAPPORT 889-1 *

ÉVALUATION EN TEMPS RÉEL DES VOIES DE CIRCUITS RADIOÉLECTRIQUES IONOSPHÉRIQUES

(Programme d'études 27B/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Afin de tirer le meilleur parti du potentiel de l'ionosphère pour les radiocommunications en ondes décamétriques et de surmonter sa variabilité inhérente, il convient de mettre en œuvre une gestion des fréquences en trois étapes, à savoir: prévisions à long terme, prévisions à court terme et évaluation des voies en temps réel (RTCE).

1.1 *Prévisions à long terme*

Les prévisions à long terme des valeurs médianes mensuelles de certains paramètres constituent la méthode traditionnelle de gestion des fréquences et de conception des systèmes. On effectue des prévisions de planification des fréquences à partir des données ionosphériques antérieures à l'aide de méthodes telles que celles décrites dans le Rapport 252. Les fréquences sont choisies de façon à garantir un taux de succès d'au moins 90% pour les radiocommunications, quelles que soient l'heure du jour, la saison et la période du cycle solaire. A ce stade, il faut également prendre des décisions techniques concernant la puissance d'émission et les antennes adéquates.

Les fréquences optimales de travail (FOT) pour un circuit particulier sont définies pour chaque heure de la journée, habituellement pour un mois, à l'aide de calculs empiriques du rapport signal/bruit. Les prévisions de ce genre permettent d'assurer des communications acceptables bien que d'une qualité moyenne, à de nombreuses fins telles que les transmissions téléphoniques et télégraphiques.

Les difficultés qui vont de pair avec les prévisions à long terme sont les suivantes:

a) il est normalement prévu que les fréquences optimales de travail assurent des communications pour seulement 90% des jours du mois;

b) les prévisions ne tiennent pas compte des conséquences des orages ionosphériques et d'autres changements à court terme de l'ionosphère;

c) les données relatives au rapport signal/bruit ne sont pas toujours fiables et le rapport signal/bruit n'est pas nécessairement un critère suffisant pour choisir des fréquences destinées à certains types de communication;

d) on ne dispose pas de prévisions à long terme fiables de la couche E sporadique;

e) on ne tient pas compte des brouillages causés par d'autres utilisateurs;

f) certaines divergences existent entre les valeurs observées de foF2 et celles qui figurent sur les cartes du CCIR (voir Rapport 430).

1.2 *Prévisions à court terme*

La deuxième phase délicate de la planification des communications intervient lorsqu'il s'agit de spécifier quelles sont, parmi les fréquences assignées, celles qui sont en fait disponibles à un moment donné, en tenant compte de la variabilité à court terme de l'ionosphère. Les Rapports 727 et 888 décrivent des techniques fondées sur des observations faites en temps réel du Soleil, de l'ionosphère et des fréquences effectivement utilisées pour un circuit donné. Il est possible, grâce à ces techniques, de surveiller en temps réel l'ionosphère et d'établir des prévisions à une échelle allant de la minute à la journée et ainsi de surmonter les difficultés mentionnées aux § a) et b) ci-dessus. Les méthodes de prévision à court terme de la propagation en ondes décamétriques n'ont pas encore été testées complètement, faute de systèmes adéquats de surveillance du Soleil. Rothmuller [1978], à la suite d'essais en exploitation mettant à profit les données solaires fournies par le satellite Solrad HI, a constaté que le nombre des interruptions des ondes décamétriques dues à la propagation était réduit de 15% et que la durée de ces interruptions était réduite de 15 à 20%.

Toutefois ces techniques n'indiquent pas quelles fréquences assignées seraient le mieux adaptées à un certain type de communication à une heure déterminée. De même les prévisions relatives à la gamme des fréquences ne sont pas tout à fait sûres étant donné les erreurs inévitables dans les techniques de prévision.

---

* Ce Rapport est porté à l'attention de la Commission d'études 3.

1.3 *Evaluation des voies en temps réel (RTCE)*

D'après Darnell [1978]:

«L'évaluation des voies en temps réel est le processus permettant de mesurer en temps réel les paramètres appropriés d'un ensemble de voies de communication et d'utiliser les données ainsi obtenues en vue de décrire quantitativement les états de ces voies et donc les capacités relatives d'acheminement d'une ou de classes données de trafic.»

Le RTCE (real time channel evaluation) est la troisième phase de la gestion des fréquences nécessaire pour assurer des communications à ondes décamétriques fiables et de haute qualité même dans les conditions les plus défavorables. C'est à ce stade que toutes les fréquences assignées disponibles, comme l'indiquent les prévisions à court terme portant sur la bande de fréquences utilisable, sont examinées en temps réel afin de déterminer quelle est la meilleure pour certaines communications.

Une technique supplémentaire de la gestion des fréquences peut consister à combiner les prévisions à court terme et à long terme avec le RTCE. Uffelman [1982] ainsi que Uffelman et autres [1982] ont indiqué une méthode qui, pour parvenir à une amélioration des systèmes, permet de combiner des modèles simples avec des données du RTCE. Cette technique de gestion des fréquences est importante pour le cas où il y a lieu d'extrapoler les données du RTCE dans le temps et dans l'espace.

Comme l'a indiqué Darnell [1975a], il n'est pas nécessaire que le correspondant connaisse les principes physiques, fondamentaux et détaillés qui sont à l'origine des distorsions imposées à un signal donné par le milieu ionosphérique, mais plutôt qu'il sache qu'il peut obtenir les valeurs des paramètres d'un modèle approprié en temps réel qui décrit comme il convient le comportement du trajet. Une fois obtenues les données relatives au modèle, le correspondant peut les utiliser pour adapter de façon optimale le format du signal et les algorithmes de traitement du signal applicables à la liaison considérée.

Il est possible d'utiliser le RTCE pour résoudre les problèmes c), d), e) et f) énumérés au § 1.1. Il n'est pas nécessaire que les systèmes RTCE utilisent des modèles synoptiques du bruit atmosphèrique ou artificiel étant donné que ces systèmes peuvent mesurer en temps réel le bruit à la fréquence de fonctionnement. Par ailleurs, le système peut mesurer les paramètres les mieux adaptés au type de modulation du signal utilisé. Ces systèmes peuvent également tirer parti des modes de propagation par E sporadique qui permettent souvent la propagation à des fréquences supérieures à la MUF de référence de la couche F et des taux d'erreur très faibles. Les systèmes RTCE tiennent directement compte du brouillage car ils peuvent sélectionner des fréquences supérieures à la MUF de référence prévue: l'utilisation de fréquences plus élevées qui sont en général affectées de niveaux plus faibles de brouillage est alors possible.

Dans la définition du RTCE qui vient d'être donnée, on peut relever un certain nombre de points importants:

- le processus décrit dans cette définition consiste essentiellement à établir des modèles numériques simplifiés de voies;
- les paramètres mesurés doivent être de nature à fournir un modèle approprié au type de modulation et au débit d'information;
- «Temps réel» signifie que les valeurs du paramètre mesurées doivent être mises à jour à intervalles de temps plus courts que le temps de réponse effectif du système de communication si l'on veut contrôler les entrées;
- les capacités relatives des voies à acheminer une classe ou des classes données de trafic doivent être exprimées en termes ayant une signification pour l'usager et pour celui qui commande le système, c'est-à-dire un taux d'erreur pour les données numériques et un niveau d'intelligibilité pour la téléphonie.

2. Facteurs ayant une incidence sur la qualité des voies

2.1 *Dispersion temporelle et fréquentielle*

En règle générale, deux sources fondamentales de distorsion du signal sont associées aux trajets à ondes décamétriques – la dispersion temporelle et la dispersion fréquentielle. Les effets de ces mécanismes sont facilement représentés par la «fonction de propagation des voies», dont un exemple est présenté à la Fig. 1. C'est une fonction composite montrant les effets de dispersion du trajet sur une impulsion idéale dans le domaine du temps et sur une tonalité unique à onde entretenue dans le domaine des fréquences.

L'exemple propose trois modes de propagation distincts, qui peuvent être dus à des réflexions sur des couches ionosphériques différentes et/ou à des réflexions multiples sur une même couche. Toute fonction de propagation donnée n'offre une description valable du comportement du trajet que dans le cas d'une fréquence porteuse radioélectrique spécifiée et pendant une période où l'ionosphère reste sensiblement constante. A plus long terme, les variations dans le temps des paramètres du trajet entraîneront des modifications du nombre des modes, des amplitudes de mode et des temps de propagation, ainsi que de la forme des distributions associées à chacun de ces modes.

La plupart des modèles de trajet utilisés dans les systèmes RTCE sont établis en tenant compte de la fonction de propagation et appartiennent en général à l'une ou l'autre des catégories, celle du domaine du temps ou celle du domaine des fréquences, compte tenu de la nature des signaux qui doivent être transmis sur la liaison de communication correspondante.

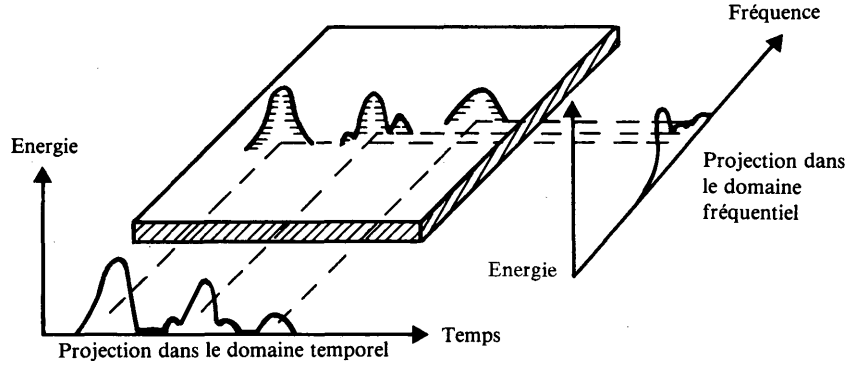


FIGURE 1 – *Fonction caractéristique de propagation de la voie [Darnell, 1975a]*

2.1.1 *Dispersion temporelle*

La projection du domaine-temps de la fonction de propagation donne l'amplitude de mode et les temps de propagation relatifs de la propagation à modes multiples. Il a été largement reconnu que ce genre de propagation est une grande source d'erreurs dans les transmissions de données numériques à modulation par déplacement de phase (MDP) qui s'avère habituellement être un taux d'erreur irréductible, impossible à améliorer en augmentant le rapport signal/bruit. Cet effet, appelé brouillage entre symboles, se produit lorsque l'étalement des temps de propagation devient comparable à la durée de la période correspondant à la trame de données numériques. Cet effet a pu être en grande partie neutralisé en utilisant des tonalités multiples, acheminant chacune des données numériques avec une rapidité de modulation relativement faible. Par exemple, une technique à tonalité parallèle utilisant la manipulation par déplacement de phase différentielle (MDPD) permet des débits de données allant jusqu'à 2400 bit/s [Mosier et Clabaugh, 1958] avec, en général, 16 tonalités acheminant chacune des données à 75 Bd.

Des études théoriques récentes [Li, 1981; Dai, 1981, 1985] indiquent qu'il est possible de réduire l'effet du brouillage entre symboles sur la probabilité d'erreurs sur les bits et d'augmenter le débit des données par l'application de la technique de la détection séquentielle.

2.1.2 *Dispersion fréquentielle*

Les conséquences de la dispersion fréquentielle sont moins connues. Elle accompagne invariablement une dispersion temporelle mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai – la dispersion fréquentielle peut se produire en l'absence d'une dispersion temporelle importante [Clarke et Tibble, 1978]. La dispersion fréquentielle se produit parce que les composantes d'une onde ionosphérique traversent différentes régions de l'ionosphère et, par conséquent, sont affectées de différents décalages de fréquence dus à l'effet Doppler. Le champ de l'onde qui en résulte s'évanouit à un taux qui dépend de l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler. Une analyse de la transmission MDPD à tonalité parallèle à 75 Bd entre Townsville et Sydney a montré une corrélation nettement positive entre le taux d'erreur binaire et l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler d'une tonalité à onde entretenue dans la bande passante à 3 kHz du signal de données [Clarke, 1979].

2.2 *Paramètres indiquant la qualité des voies*

Il existe plusieurs types de systèmes RTCE ainsi que de nombreux paramètres mesurables sur lesquels il est possible de fonder un système RTCE particulier. Les paramètres dépendant du temps et de la fréquence qu'il est possible de mesurer dans le récepteur RTCE, sont par exemple:

- le mode de propagation ionosphérique,
- l'étalement du temps de propagation du signal,
- l'amplitude du signal,

- le niveau du bruit de fond,
- la phase du signal (absolue ou différentielle),
- l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler,
- la qualité du signal reçu, c'est-à-dire intelligibilité téléphonique, taux d'erreur binaire.

3. Classes de systèmes RTCE

Des systèmes RTCE pratiques fondés sur des mesures de un ou plusieurs des paramètres identifiés au § 2.2 [Darnell, 1975a] sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.1 *RTCE de classe I — Prétraitement à distance du signal transmis*

Un stimulus de voie $x(t)$ est transmis de façon répétée sur la voie à ondes décamétriques à partir d'une station de base. A part la condition de ne pas causer de brouillages aux autres utilisateurs du spectre, aucune restriction n'est imposée à la forme de $x(t)$; ce pourrait être un signal codé relativement complexe. Un équipement de traitement spécialisé situé dans une station éloignée analyse la version reçue $y(t)$ du stimulus de voie et élabore un modèle de trajet approprié. Dans le processus de modélisation, on peut légitimement incorporer des données d'évaluation de la voie provenant d'autres sources, si toutefois elles sont appropriées [Sailors et Hill, 1977].

3.1.1 *Sondages ionosphériques à incidence oblique*

La forme la plus connue et la plus utilisée de RTCE est le sondage ionosphérique à incidence oblique dont il existe plusieurs types. Le type le plus simple est un sondeur à impulsions utilisant une émission et une réception synchronisées en temps et en fréquence [Darnell, 1978] (Rapport 249). Un ionogramme en indice oblique (Fig. 2) peut être utilisé pour éviter des bandes de brouillage évidentes et sélectionner des gammes de fréquences là où n'existe qu'un seul mode de propagation. En revanche, s'il n'y a pas de zones de propagation à un seul mode, il est possible de déterminer un facteur de qualité pour une voie particulière en considérant les énergies des divers modes de propagation à cette fréquence. Cette méthode d'évaluation des voies est fondée sur l'hypothèse qu'une propagation à un seul mode doit fournir les meilleures voies de communication étant donné que cela limite la dispersion temporelle totale pour le trajet et réduit aussi le brouillage entre symboles [Darnell, 1978].

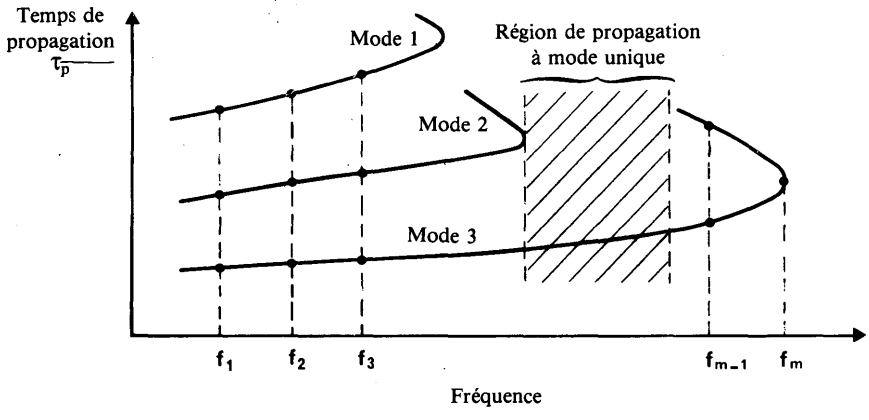


FIGURE 2 — *Ionogramme à incidence oblique idéalisé montrant la gamme de fréquences admettant un seul mode de propagation [Darnell, 1978]*

Des sondeurs à impulsions émettent de brèves impulsions à des instants donnés sur des voies présélectionnées, espacées en fréquence dans toute la bande des ondes décamétriques ou dans une partie de cette bande. On peut faire varier à volonté l'horaire des émissions selon un «programme»; en règle générale, on le commande à l'aide d'une horloge que l'on peut caler sur un étalon de temps extérieur. A la station éloignée, le récepteur du sondeur est synchronisé avec une émission de signaux de temps, qui peut être la même que ci-dessus ou une émission semblable. Si l'on veut avoir une plus grande résolution dans le temps, on a intérêt à équiper la station d'émission et celle de réception d'étalons atomiques de temps ou d'étalons de fréquence. L'effet des fluctuations rapides sur les propriétés des modes peut être réduit si plusieurs impulsions sont transmises sur chaque fréquence et si l'on prend la moyenne des réponses reçues. Ces récepteurs de sondeurs fonctionnent avec des impulsions étroites, qui supposent de grandes largeurs de bande; ils ont donc tendance à être plus sensibles aux brouillages.

Une variante importante du système de sondage à impulsions de base consiste à moduler les diverses impulsions sur chaque fréquence. Cela présente trois avantages importants [Darnell, 1975a; Sailors et Hill, 1977]:

- appliquer un codage de compression des impulsions pour améliorer les propriétés de résolution temporelle du système sans avoir à raccourcir la longueur des impulsions de base et d'augmenter la puissance de crête de l'émission;
- transmettre une quantité limitée de données par l'intermédiaire du codage de modulation des impulsions, par exemple des informations sur les niveaux de brouillage de la station de base pour les fréquences assignées;
- améliorer les performances dans le cas d'un environnement à fort niveau de brouillage.

Le «chirp» ou sondeur à modulation de fréquence à onde entretenue est un autre type de sondeur ionosphérique à incidence oblique. Là aussi il faut un émetteur et un récepteur synchronisés, mais au lieu d'émettre des impulsions, on émet une fréquence de balayage à faible niveau qui suit en général un modèle linéaire ou logarithmique et peut couvrir une partie ou la totalité de la bande des ondes décamétriques. Un balayage de fréquences similaire est produit dans le récepteur et utilisé efficacement en tant que signal d'entrée de l'oscillateur local. Le signal reçu sur le trajet ionosphérique est mélangé avec le signal de balayage du récepteur et le signal qui en résulte fait l'objet d'une analyse spectrale. Une propagation par trajets multiples produit à la réception de multiples fréquences de balayage avec des amplitudes et des temps de propagation relatifs différents. L'analyse spectrale montre les écarts de fréquence entre les fréquences de balayage reçues et les fréquences de balayage de l'oscillateur local, le déplacement des fréquences étant proportionnel au temps de propagation dans le cas d'une fréquence de balayage linéaire et les amplitudes étant correctement transcrites dans le domaine des fréquences [Barry et Fenwick, 1965; Darnell, 1978].

3.1.1.1 *Systèmes de radiocommunication d'utilisation générale*

Il existe aux Etats-Unis d'Amérique un système de transmission radioélectrique d'utilisation générale (CURTS), dans lequel un réseau de sondeurs fixes assure une couverture complète de la zone pour tous les usagers disposant de récepteurs compatibles [Probst, 1968].

Les essais CURTS effectués dans le Pacifique Sud en 1966-1967 utilisaient des sondeurs obliques ainsi que d'autres équipements permettant de contrôler un réseau à ondes décamétriques fonctionnant sur 8 trajets [Probst, 1968]. On a également effectué d'autres courts essais [Ramsay et autres, 1967; Felpenin et autres, 1968]. L'algorithme de commande était fondé sur les prévisions relatives aux caractéristiques du taux d'erreur binaire (TEB) pour un certain nombre de fréquences assignées et utilisant des valeurs mesurées du champ, du bruit et du brouillage, de la dispersion temporelle et de la dispersion fréquentielle.

Au Japon, un réseau de cinq ionosondes fonctionne avec des heures de début de sondage coordonnées afin de fournir une évaluation des voies en temps réel aux utilisateurs ordinaires se trouvant dans des endroits éloignés, et disposant d'une réception synchronisée [Kuriki et Takeuchi, 1986].

3.1.1.2 *Limites du système fondé sur les sondages ionosphériques à incidence oblique*

D'après des ionogrammes en incidence oblique, on peut identifier les modes de propagation, mesurer la fréquence maximale observée (MOF) et déterminer la gamme des fréquences sur lesquelles intervient un seul mode de propagation. Il est alors possible de choisir une antenne et les voies de fréquence appropriées aux conditions réelles [Barry et Fenwick, 1975]. Il est également possible d'utiliser des données relatives au rapport signal/bruit si ces dernières existent.

La transmission de données Kineplex entre Townsville et Sydney a montré toutefois que le nombre de modes de propagation intervenant à une fréquence donnée n'est pas un très bon indicateur de la qualité du circuit associé [Clarke, 1979]. La meilleure réception a été obtenue pendant les mois d'été, lorsque la propagation s'effectuait par l'intermédiaire de la couche E sporadique à des fréquences supérieures à la fréquence maximale observée (MOF) de la couche F. En hiver et pendant les mois d'équinoxe, lorsqu'il n'y avait habituellement pas de couche E sporadique, et que la propagation s'effectuait par l'intermédiaire de la couche F, on n'a pas trouvé de corrélation globale entre la qualité des données et le nombre de modes bien que, dans des cas individuels, le taux d'erreur ait été réduit de deux ordres de grandeur en passant d'une propagation à plusieurs modes à une propagation à un seul mode par la couche F. Les erreurs de données avaient tendance à se produire en salves et coïncidaient avec des évanouissements d'amplitude supérieurs à 20 dB environ [Clarke, 1979].

L'absence de corrélation globale entre la qualité des données et le nombre de modes provient vraisemblablement du fait que, même si plusieurs modes interviennent, le mode d'ordre inférieur est en général au moins supérieur de 10 dB aux autres modes à la même fréquence. La propagation est alors effectivement en mode unique même si l'ionogramme indique la présence de plusieurs modes.

Même lorsqu'un ionogramme indique une propagation à un seul mode par la couche F, la propagation peut en réalité comprendre des composantes de trajets multiples qui ne peuvent être résolues sur l'ionogramme. Il peut s'agir de composantes magnétoioniques, de composantes résultant de la courbure ionosphérique causée par les perturbations ionosphériques itinérantes ou encore d'irrégularités plus petites, comme F-diffus [Clarke et Tibble, 1978]. Ces effets, en particulier F-diffus, peuvent causer de profonds évanouissements d'amplitude et réduire en conséquence la qualité des données bien que l'ionogramme en incidence oblique indique une propagation à un seul mode [Clarke, 1979].

L'un des problèmes posés par l'utilisation d'un sondeur ionosphérique à incidence oblique pour RTCE est qu'il faut interpréter les ionogrammes pour obtenir une utilisation optimale de l'instrument, alors que le système RTCE idéal devrait être automatique. L'élaboration d'algorithmes efficaces permettant l'interprétation automatique d'ionogrammes est une tâche importante impliquant l'utilisation de techniques complexes de reconnaissance des formes.

3.1.2 *Evaluation des voies et appel* (CHEC)

Un autre système RTCE de classe I, appelé CHEC (évaluation des voies et appel) a été mis au point au Canada [Stevens, 1968]. Ce système a été conçu essentiellement pour le cas où il faut une station mobile ou plus pour acheminer le trafic vers une station de base. Il est fondé sur l'hypothèse selon laquelle le trajet de communication dans le sens station mobile-station de base est le seul qui puisse présenter des difficultés, en raison de l'inefficacité de l'antenne et de la faible puissance de l'émetteur généralement inhérentes aux systèmes mobiles.

Le CHEC est un système de sondage «dans la voie», c'est-à-dire qu'il sonde dans les voies de fréquence réellement assignées à l'usager, contrairement aux sondeurs ionosphériques sous incidence oblique, qui rayonnent dans les voies non assignées – cette technique est admissible uniquement parce que les impulsions sont suffisamment courtes pour ne causer qu'un brouillage négligeable aux autres correspondants. Dans chacune des voies, relativement peu nombreuses, l'émetteur de base du CHEC émet un signal de plusieurs secondes qui est codé à l'aide d'un code d'appel sélectif, des données sur le niveau de brouillage à la station de base dans cette voie et une partie en ondes entretenues.

Au récepteur éloigné spécifié par l'appel sélectif, le niveau de brouillage à la station de base dans chacune des autres voies est décodé et on mesure l'intensité du signal à l'aide de la partie en ondes entretenues de l'émission. En tenant compte des caractéristiques relatives des antennes de la station de base et de la station éloignée, et en supposant que la réciprocité existe, un processeur spécialisé, à la station éloignée, calcule la voie optimale pour l'émission vers la station de base en se fondant sur le critère du rapport prévu signal/bruit à la station de base, dû à l'émetteur éloigné.

Des expériences faites avec des prototypes ont montré que l'utilisation de la technique CHEC améliore sensiblement la disponibilité des voies.

Un système du type CHEC, piloté par microprocesseur, a été mis au point [Chow et autres, 1981; McLarnon, 1982] et appelé RACE (Radiotéléphone avec évaluation automatique des voies).

3.2 *RTCE de classe II – Prétraitement du signal de la station de base*

Le stimulus de voie $x(t)$ est transmis sur la voie et l'énergie qui est réfléchie en amont sous la forme d'un signal $y(t)$ est reçue à la station de base et utilisée dans le processus d'évaluation de la voie.

Les techniques de traitement employées dans les systèmes concrets de classe II sont pour la plupart très semblables à celles utilisées avec les sondeurs ionosphériques à incidence oblique de classe I. Elles évaluent essentiellement une fonction linéaire de la réponse impulsionnelle pour la voie. Cependant, dans la classe II, la réponse impulsionnelle est mesurée seulement à partir de la station de base.

Il existe trois formes courantes de sondage en un «emplacement unique»: le sondage à incidence verticale, le sondage par rétrodiffusion et le contrôle des fréquences.

3.2.1 *Sondage à incidence verticale*

Un sondeur à incidence verticale émet un signal de sondage capable de prendre l'une des formes décrites précédemment pour le sondage en incidence oblique. Les signaux de retour réfléchis sont traités par un récepteur synchronisé pour produire un ionogramme sous incidence verticale. Un des progrès les plus importants de ces dernières années est l'ionosonde numérique [Bibl et Reinisch, 1978; Wright et Pitteway, 1979a, b].

Les données d'incidence verticale peuvent être utilisées directement dans la formulation d'un modèle pour de courts trajets ionosphériques, par exemple jusqu'à 300 km environ. Pour des trajets plus longs, on peut appliquer des calculs géométriques aux données des ionogrammes pour calculer les propriétés en incidence oblique. La validité de ces calculs dépend du degré de corrélation entre l'ionosphère au point de réflexion du circuit et l'ionosphère à la station de base. Rush [1976] a étudié dans quelle mesure on peut déduire d'une observation effectuée en un point les conditions en un autre point.

3.2.2 *Sondage par rétrodiffusion*

Le sondage par rétrodiffusion peut être réalisé en un seul emplacement, l'énergie transmise étant rayonnée obliquement. Le signal reçu est dû à l'énergie qui a été propagée par l'intermédiaire de l'ionosphère et réfléchie par le sol vers la base par une réflexion ionosphérique similaire.

Dans ce type de système, l'affaiblissement est important en raison des très fortes pertes au sol, et il faut des puissances d'émission bien supérieures à celles requises pour les ionosondes sous incidence verticale ou oblique. La définition de l'ionogramme de rétrodiffusion est aussi plus mauvaise que celle des ionogrammes sous incidence oblique ou verticale. Cependant, le sondage par rétrodiffusion donne une bonne indication des gammes de fréquences utilisables pour des trajets à un seul bond. Les trajets à bonds multiples ont tendance à subir des affaiblissements excessifs sur le parcours. Les formes de modulation utilisées pour les sondeurs à incidence oblique peuvent être utilisées dans les systèmes à rétrodiffusion. Le sondage par rétrodiffusion a été étudié par Croft [1972]; il est aussi traité brièvement dans le Rapport 726. Il peut fonctionner soit à fréquence fixe soit à balayage de fréquences et habituellement avec des réseaux d'antennes hautement directives.

Il semble que les principales applications opérationnelles du sondage par rétrodiffusion concernent la radiodiffusion et les radars à ondes décamétriques. Elles consistent à ajouter une modulation pratiquement inaudible aux émissions de radiodiffusion puis à recevoir par rétrodiffusion l'énergie modulée. Ces sondages pourraient aider le personnel de l'émetteur à déterminer la bande de radiodiffusion optimale et l'antenne d'émission pour chacune des zones de couverture désirée. Dans la pratique, la fréquence émise n'est en général pas modifiée à court terme et les indications opérationnelles en temps réel porteraient sur l'angle de site de l'énergie émise, en utilisant un autre réseau d'antennes possédant des caractéristiques plus appropriées. Le volume d'énergie réfléchie par l'ionosphère est donc dirigé vers la zone cible, maîtrisant les variations d'un jour à l'autre de la géométrie du circuit dues aux variations correspondantes de l'ionosphère.

Headrick et Skolnik [1974] ont décrit l'importance du sondage par rétrodiffusion pour le radar à ondes décamétriques. Un procédé qui permet de s'assurer que les conditions de réception d'un canal radioélectrique présélectionné selon un horaire de fonctionnement approprié sont convenables, a été étudié par David et autres [1976]. Earl et Ward [1986] ont décrit un système de sondage de rétrodiffusion utilisé avec un radar à ondes décamétriques. Ce système fournit des estimations en temps réel des niveaux de puissance étalonnés de rétrodiffusion et des estimations simultanées des niveaux de bruit dans la bande décamétrique.

Le sondage par rétrodiffusion peut aussi être utilisé pour contrôler la couche E sporadique le long du circuit, étant donné que les échos de rétrodiffusion ont une signature caractéristique [Croft 1972]. Les modes de propagation par E sporadique donnent souvent des taux d'erreur excessivement bas. Cependant, l'interprétation des échos de rétrodiffusion est un problème très complexe qui nécessite l'intervention d'un opérateur, alors que les systèmes de contrôle Doppler peuvent détecter les modes de propagation par E sporadique plus simplement grâce à leur décalage par effet Doppler pratiquement nul (voir le § 3.3.1).

3.2.3 *Contrôle des fréquences*

Sous sa forme originale, le RTCE en un seul emplacement se présente comme un dispositif dans lequel la bande de fréquences est explorée manuellement à l'aide d'un récepteur afin d'évaluer les transmissions identifiables qui se propagent à partir d'un emplacement donné, ainsi que leurs qualités relatives. L'hypothèse de la réciprocité permet de faire une estimation approximative de la fréquence qui doit être utilisée pour la transmission vers un emplacement spécifié. Cette procédure peut maintenant être complétée à l'aide de réseaux d'antennes de réception adaptables ou orientables qui permettraient d'obtenir une orientation du «pinceau» à la fois en azimut et en site. Cette procédure permettra d'inclure des transmissions non identifiables dans le processus passif RTCE étant donné que leurs positions peuvent être évaluées en mesurant l'angle d'arrivée en azimuth et en site.

3.3 *RTCE de classe III — Traitement du signal reçu à la station éloignée*

Le stimulus de voie $x(t)$ et l'entrée des données de la station de base $b(t)$ sont multiplexés avant d'être transmis sur la voie à ondes décamétriques. A la station éloignée, le signal reçu $y(t)$ est démultiplexé, traité, puis utilisé pour l'élaboration d'un modèle qui détermine ensuite la stratégie de traitement du signal à appliquer au signal de données déformé $b'(t)$ pour fournir l'estimation de $b(t)$.

3.3.1 *Sondage à fréquence pilote*

Dans le sondage à fréquence pilote [Betts et Darnell, 1975], des tonalités à faible niveau en ondes entretenues sont insérées dans le spectre des données ou transmises dans d'autres voies éventuellement disponibles. Au récepteur, des mesures simples effectuées sur les tonalités permettent de spécifier les états relatifs des voies en fonction des taux d'erreur de données (numériques) prévus. Si l'on utilise un radiodiffuseur à composantes multiples pour rayonner simultanément des données identiques sur chacune des différentes fréquences, ce type de système RTCE permet de choisir automatiquement, au récepteur, la meilleure composante.

Les paramètres des tonalités en ondes entretenues qui ont été mesurés et utilisés séparément ou ensemble pour le RTCE comprennent: l'amplitude, le rapport signal/bruit, la phase, l'étalement et le décalage de fréquence par effet Doppler et l'étalement (temps de propagation) par trajets multiples. La mesure de l'amplitude en fonction du temps permet de déterminer la profondeur d'évanouissement que Clarke [1979] a estimé étroitement associée aux erreurs dans le signal reçu une fois que le seuil de profondeur d'évanouissement (environ 20 dB) est dépassé. Betts et Darnell [1975] ont utilisé les mesures de phase pour prévoir les taux d'erreur dans les systèmes MDP de données numériques qui sont affectées par des erreurs de phase au-dessus d'un certain seuil.

Bello [1965] a décrit des techniques de mesure, en temps réel, de l'étalement dû aux trajets multiples et à l'effet Doppler, qui causent respectivement un évanouissement sélectif en fréquences et sélectif dans le temps. La mesure du décalage de fréquence par effet Doppler sert à identifier les modes de propagation par E sporadique, qui ont un décalage par effet Doppler pratiquement nul. Les modes de propagation par la couche F ont rarement des décalages par effet Doppler nuls en raison des perturbations ionosphériques itinérantes et des transitions au lever et au coucher du Soleil.

La principale conclusion que l'on peut tirer des résultats des essais effectués est que, pour la plupart des conditions de trajet en ondes décamétriques, le taux d'erreur de données que l'on obtiendra avec un plan de modulation donné peut être prévu avec une précision raisonnable à l'aide de mesures simples effectuées sur une onde pilote de faible niveau.

Un des principaux avantages des techniques RTCE à fréquence pilote est l'extrême simplicité de la conception et de la mise en œuvre, par rapport à d'autres techniques utilisées pour RTCE, par exemple les ionosondes en incidence oblique. Cette technique a aussi l'avantage de permettre de combiner les signaux RTCE et les signaux de données dans un format simple, au lieu d'exiger un stimulus séparé. Cette technique se prête aussi à l'automatisation. Avec un système automatisé, il ne sera pas difficile, en principe, d'inclure dans l'algorithme, pour choisir la fréquence optimale de travail, des mesures d'autres propriétés appropriées de l'onde pilote par exemple: amplitude, déplacement par effet Doppler et largeur spectrale. On pourrait aussi inclure le niveau de bruit dans la voie.

La technique de sondage à fréquence pilote ne permet pas de déterminer la MUF d'exploitation ni d'identifier les modes de propagation. Dans le premier cas des difficultés peuvent surgir lorsque la MUF décroît (par exemple en raison de la variation diurne normale) si la fréquence de travail est juste au-dessous de la MUF. Les difficultés peuvent être sérieuses si la MUF varie sensiblement pendant le temps de fonctionnement de RTCE (en général 3 minutes par voie).

3.3.2 *RTCE par comptage d'erreurs*

La technique de comptage d'erreurs étudiée par Darnell [1978] utilise un signal d'essai dont les paramètres sont essentiellement les mêmes que ceux du signal de trafic. Le signal d'essai occupe successivement chacune des bandes assignées et établit un taux d'erreur binaire pour chaque voie. Cette technique présente l'avantage évident de mesurer directement la qualité des données numériques.

La voie acheminant le trafic ne peut cependant être comparée facilement avec les autres voies pour déterminer s'il est souhaitable de changer la fréquence de fonctionnement.

Pour certaines formes de trafic, il est possible de déduire les données RTCE du système normal en fonctionnement, c'est-à-dire qu'une voie peut être évaluée alors qu'elle achemine réellement du trafic. Darnell [1978] décrit divers systèmes possibles.

3.4 *Systèmes RTCE fonctionnant dans une seule voie assignée*

Toutes les techniques RTCE précédemment décrites sont applicables aux cas où un certain nombre de voies est à la disposition de l'usager. Or, dans de nombreux cas, le correspondant peut souhaiter étudier de façon plus détaillée le cas d'une certaine voie. Darnell [1983] a donné des exemples de techniques utilisables. Un système RTCE dans la bande pourrait constituer la base d'une évaluation passive du brouillage en vue d'une inclusion dans les procédés RTCE.

4. Résultats des essais pratiques

4.1 *Utilisation des techniques de comptage d'erreurs*

Darnell [1978] a décrit les résultats des essais d'un système RTCE basé sur des techniques de comptage d'erreurs qui a utilisé deux types de trafic: Oslo (Norvège) à la Haye (Pays-Bas) (environ 1100 km) en juin 1976 et Cornouailles (Royaume-Uni) à La Haye (environ 700 km) en octobre/novembre 1976.

Pour chaque trajet, on disposait de 10 voies de fréquence assignées. Pendant des périodes de 24 heures, la qualité du signal, en fonction du nombre d'erreurs pour les données numériques, était échantillonnée pendant des durées de 5 minutes par heure sur chaque fréquence. On autorisait une minute et demie pour les changements de fréquence entre les périodes d'échantillonnage.

La qualité d'un circuit utilisant deux fréquences choisies à l'aide de techniques classiques de prévision de fréquences a été comparée à celle obtenue à l'aide de la sélection de fréquences fondée sur les données RTCE. La première technique se limitait à utiliser une fréquence de jour et une fréquence de nuit. Les résultats des essais ont indiqué que, pour les deux types de trafic examinés, on pouvait obtenir une augmentation sensible du pourcentage de fiabilité du circuit, environ 45%, en utilisant le RTCE au lieu des techniques de séléction de deux fréquences.

4.2 *Utilisation des techniques à fréquence pilote*

Betts et Darnell [1975] ont décrit une expérience pour vérifier les relations déduites théoriquement entre la fréquence des erreurs sur la phase d'une tonalité pilote et la fréquence des erreurs des données transmises en modulation par déplacement de fréquence (MDF). On a effectué trois essais sur des circuits de 850, 1700 et 9800 km.

Les résultats ont confirmé les relations prévues entre le taux d'erreur de données MDF et le taux d'erreur sur la phase de la tonalité pilote. Des écarts importants sont apparus pendant moins de 1% de la durée totale des données enregistrées. Ces écarts étaient essentiellement imputables à un évanouissement très rapide (supérieur à un évanouissement/s) et à un certain brouillage inhabituel et très intense d'origine artificielle.

Clarke [1985] a constaté que le taux d'erreur binaire (TEB), obtenu avec des modems à tonalité parallèle, fonctionnant à vitesse moyenne sur un circuit de 1600 km, varie en fonction du rapport signal/bruit plus brouillage $S/(N + I)$ en fonction de l'étalement Doppler et en fonction de l'étalement des temps de propagation, lorsque le rapport $S/(N + I)$ dépassait 30 dB.

5. Conclusions

Il est évident qu'il est nécessaire de mettre au point des techniques RTCE – on ne pourra progresser dans l'utilisation des ondes décamétriques que si le correspondant qui utilise une liaison spécifique à un moment donné, dispose de données en temps réel sur les paramètres pertinents du trajet. Il ne suffit pas de se fier aux prévisions à long terme ni même à court terme des fréquences dont l'ionosphère permet la propagation sur cette liaison.

Le problème de l'optimisation du signal dans la bande décamétrique est très complexe [Darnell, 1975b] et à ce jour, le système RTCE a été utilisé presque exclusivement comme aide pour la sélection des fréquences. Darnell [1975a] énumère les divers paramètres d'une liaison à ondes décamétriques qui pourraient être commandés par le correspondant et de cette façon être adaptés en fonction de la réponse aux données de RTCE:

- fréquence d'émission;
- niveau de puissance à l'émission;
- largeur de bande;
- débit binaire;
- type de modulation;
- heure à laquelle s'effectue l'émission;
- algorithme de traitement du signal, au récepteur;
- angles de site pour les faisceaux de réseaux d'antennes;
- type de diversité.

On peut ajouter à cette liste la polarisation d'antenne pour la propagation à incidence quasi verticale.

D'après Darnell [1975a], les avantages possibles qu'offrent les techniques RTCE sont les suivants:

- l'effet du bruit et du brouillage artificiels peut être mesuré et spécifié quantitativement [Darnell, 1979];
- la possibilité de mesurer la propagation et le brouillage en temps réel et en ligne permet d'utiliser des modes de propagation relativement transitoires, par exemple la propagation par E sporadique;
- l'évaluation de RTCE permet d'utiliser de façon plus efficace le spectre des fréquences, en tendant à sélectionner des voies de fréquences plus élevées que celles qui seraient choisies par les techniques de prévision. En conséquence, l'encombrement du spectre est réduit;
- RTCE offrira le moyen de sélectionner automatiquement la meilleure fréquence et d'indiquer simultanément les voies de réserve préférées;
- la puissance de l'émetteur peut être réduite, à condition d'assurer une qualité acceptable du trafic reçu;
- à plus long terme, on pourra utiliser les données de RTCE afin d'adapter de façon optimale d'autres paramètres d'un système de télécommunications, en plus de la fréquence, pour les conditions dominantes du trajet.

La sélection des fréquences à évaluer peut se faire sur la base des prévisions à long terme mises à jour par les prévisions à court terme. De plus, avec un réseau de communications, il faut répartir la gamme totale des fréquences assignées, conformément à un certain plan général, afin d'éviter tout brouillage inutile entre les membres du réseau.

George et Halligan [1985] ont décrit un «sondeur de qualité des voies» utilisable sur les circuits de données fonctionnant à des débits de 2400 à 4800 bit/s.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARRY, G. H. et FENWICK, R. B. [1965] Extra-terrestrial and ionospheric sounding with synthesized frequency sweeps. *HPJ*, Vol. 16, **11**, 8-12.

BARRY, G. et FENWICK, R. B. [1975] Techniques for real-time HF channel measurement and optimum data transmission. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere.* Ed. W. T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BELLO, P. A. [1965] Some techniques for the instantaneous real-time measurement of multipath and Doppler spread. *IEEE Trans. Com. Tech.*, Vol. 13, **3**, 285-292.

BETTS, J. A. et DARNELL, M. [1975] Real-time HF channel estimation by phase measurements on low-level pilot tones. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*, Paper 18. Ed. W. T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BIBL, K. et REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.

CHOW, S. M., IRVINE, G. W., McLARNON, B. D. et KAYE, A. R. [1981] Communications for small communities in developing countries. Proc. Pacific Telecommunications Conference, Pacific Telecommunications Council, Honolulu, Hawaii.

CLARKE, R. H. [1979] Influence of ionospheric irregularities on HF skywave communications. Article présenté à la Sydney Ionospheric Propagation Conference du 14 au 17 mai. Résumé publié dans IPS-X10, Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

CLARKE, R. H. et TIBBLE, D. V. [1978] Measurement of the elevation angles of arrival of multicomponent HF skywaves. *Proc. IEE*, Vol. 125, **1**, 17-24.

CLARKE, R. H. [1985] A real-time channel evaluation technique for medium-speed digital sky-wave communications. Proc. URSI-IPS Conference on the Ionosphere and Radio Wave Propagation. Eds. D. G. Cole and L. F. McNamara. Technical Report TR-85-04. Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

CROFT, T. [1972] Sky-wave backscatter: A mean of observing our environment at great distances. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, **1**, 73-156.

DAI, Y. S. [1981] Observations concernant le document Détection séquentielle sur canaux aléatoires stationnaires doubles variables dans le temps (en chinois). *J. Inst. Comm. Chine*, Vol. 2, **4**, 97-99.

DAI, Y. S. [1985] Théorème de convergence de la probabilité de détection séquentielle sur canaux variables dans le temps et augmentation de l'erreur due au seuil de détection (en chinois). *J. Université de Hangzhou* (Edition des Sciences naturelles), Vol. 12, **1**, 27-32.

DARNELL, M. [1975a] Channel estimation techniques for HF communications. AGARD Conf. Proc. N° 173, *Radio Systems and the Ionosphere.* Paper 16.

DARNELL, M. [1975b] Adaptive signal selection for dispersive channels and its practical implications in communications system design. AGARD Conf. Proc. N° 173, "Radio Systems and the Ionosphere", Paper 23.

DARNELL, M. [1978] Channel evaluation techniques for dispersive communications paths. *Communications Systems and Random Process Theory*, Ed. J. K. Skwirzynski, Sijthoff et Noordhoff, Pays-Bas, 425-460.

DARNELL, M. [1979] An HF data modem with in-band frequency agility. IEEE Conference on recent advances in HF communications systems and techniques.

DARNELL, M. [1983] Real-time channel evaluation. AGARD LS No. 127, *Modern HF Communications*, NASA Accession No. N83-30862. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

DAVID, P., GOUTELARD, C. et VAN UFFELEN, J. P. [1976] Procédé de sélection de la fréquence optimale pour une transmission de données sur canal ionosphérique. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*, Paper 17. Ed. W. T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

EARL, G. F. et WARD, B. D. [1986] Frequency management support for remote sea-state sensing using the Jindalee sky-wave radar. *Proc. IEEE*, Special Issue – Oceanic Engineering.

FELPENIN, K. D., DAYHARSH, T. I., RAMSAY, J. L. et TUPPER, B. C. [1968] The operational validation of the CURTS concept using 2400 baud Autodin, Final Report Part 2. Stanford Research Institute SWM 16353U, Stanford, Ca., Etats-Unis d'Amérique.

GEORGE, P. L. et HALLIGAN, R. J. [1985] Techniques for real-time HF channel evaluation in aid of optimized data transmission. Proc. URSI-IPS Conference on the Ionosphere and Radio Wave Propagation. Eds. D. G. Cole and L. F. McNamara, Technical Report TR-85-04. Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

HEADRICK, J. M. et SKOLNIK, M. I. [1974] Over the horizon radar in the HF band. *Proc. IEEE*, Vol. 62, **6**, 664-673.

KURIKI, I. et TAKEUCHI, T. [1986] Vertical/oblique incidence ionospheric sounding. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 33.

LI, D. B. [1981] Détection séquentielle sur canaux aléatoires stationnaires doubles variables dans le temps (en chinois). *J. Inst. Comm. Chine*, Vol. 2, **1**, 73-85.

McLARNON, B. D. [1982] Real-time channel evaluation in an automatic HF radio telephone system. Proc. Second IEE Conference on HF Communication Systems and Techniques, Londres, Royaume-Uni.

MOSIER, R. R. et CLABAUGH, R. G. [1958] Kineplex, a bandwidth-efficient binary transmission system. *Trans. AIEE (Comm. Electron)*, Vol. 34, 723.

PROBST, S. E. [1968] The CURTS concept and current state of development dans *Ionospheric Radio Communications*, 370-379, Ed. K. Folkstad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

RAMSAY, J. L., FELPENIN, K. D. et DAYHARSH, T. I. [1967] A demonstration of the consistent operational success of 2400 baud Autodin data transmission using the CURTS Phase II System, Final Report Part 1. Stanford Research Institute SWM 16352U, Stanford, Ca., Etats-Unis d'Amérique.

ROTHMULLER, I. J. [1978] Real-time propagation assessment: initial test results. IES 1978, *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems.* Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

RUSH, C. M. [1976] Un réseau de stations d'observation de l'ionosphère destiné aux prévisions à court terme de la propagation. *J. des Télécomm.*, Vol. 43, 544-548.

SAILORS, D. B. et HILL, J. R. [1977] Simulation and measurement of high frequency ionospheric channels. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. 111, NTIS Accession No. A043384. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

STEVENS, R. W. [1968] The CHEC sounding system. *Ionospheric Radio Communications.* Ed. K. Folkstad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

UFFELMAN, D. R. [1982] HF propagation assessment studies over paths in the Atlantic. IES 1981, *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems.* Eds. J. M. Goodman, F. D. Clarke and J. Aarons. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

UFFELMAN, D. R., HARNISH, L. O. et GOODMAN, J. M. [1982] The application of real-time model update by oblique ionospheric sounders to frequency sharing. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 12-1 à 12-11. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

WRIGHT, J. W. et PITTEWAY, M. L. V. [septembre-octobre 1979a] Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde. 1. Data acquisition and real-time display. *Radio Sci.*, Vol. 14, **5**, 815-825.

WRIGHT, J. W. et PITTEWAY, M. L. V. [septembre-octobre 1979b] Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde. 2. Determination of magnetoionic mode and echo-location using a small spaced receiving array. *Radio Sci.*, Vol. 14, **5**, 827-835.

RAPPORT 890-1

UTILISATION EN EXPLOITATION DE LA DIFFUSION LATÉRALE ET DE LA RÉTRODIFFUSION

(Programme d'études 27D/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de l'utilisation en exploitation des techniques de diffusion latérale et de rétrodiffusion pour déterminer les conditions de propagation et les types inhabituels de propagation. Les bases physiques de ces techniques de diffusion sont définies dans le Rapport 726. En fait, l'utilisation en exploitation des techniques de diffusion a été strictement limitée jusqu'à aujourd'hui en raison du coût très élevé de l'équipement et des difficultés d'interprétation et d'analyse des échos diffusés.

2. Diffusion latérale

Les applications pratiques de la diffusion latérale au sol et dans l'ionosphère sont décrites dans le Rapport 726. La diffusion latérale permet:

- l'extension du temps pendant lequel une fréquence donnée peut être utilisée au-delà de l'heure où elle cesse de se propager suivant le trajet du grand cercle;
- l'emploi de fréquences supérieures à la MUF de référence;
- l'orientation de l'axe du faisceau de l'antenne de manière à obtenir un signal d'intensité maximale.

Le mode de diffusion latérale au sol pourrait également être utilisé pour maintenir des communications pendant les perturbations puisqu'il évite souvent la propagation au travers de régions où l'absorption est anormalement forte.

3. Rétrodiffusion

Les applications pratiques de données de rétrodiffusion par le sol pour estimer la MUF, l'affaiblissement de transmission et la réflectivité du sol ont été étudiées par Croft [1972] et Tchernov [1971]. Cependant, il est trois grands secteurs dans lesquels la rétrodiffusion pourrait jouer un rôle dans la prévision des conditions de propagation:

- la cartographie des distances de saut,
- la surveillance de la structure de l'ionosphère,
- la surveillance des irrégularités.

3.1 *Cartographie des distances de saut*

La détermination de la distance de saut par les techniques de rétrodiffusion apparaît suffisamment précise pour un grand nombre d'applications [Blair et autres, 1970]. Des mesures par rétrodiffusion à haute résolution ont été fort utiles pour établir la zone de couverture des émissions de radiodiffusion à ondes décamétriques. Ces mesures se font par adjonction aux émissions d'une modulation virtuellement inaudible et par réception de l'énergie modulée transmise par rétrodiffusion dans l'ionosphère [Fenwick, 1962].

Croft [1972] décrit un cas dans lequel le problème de la médiocre réception d'émissions en provenance des Etats-Unis dans certaines régions d'Amérique du Sud a été résolu au moyen de techniques de rétrodiffusion, L'une des principales zones que l'on voulait desservir se trouvait dans la zone de silence de l'émetteur en raison des effets défocalisants de l'anomalie équatoriale.

Il est donc possible d'utiliser des données de rétrodiffusion pour déterminer l'angle de site optimal pour un service spécifié de radiodiffusion à ondes décamétriques et en déduire quel réseau d'antennes choisir parmi ceux dont on dispose, ce qui permet de remédier aux variations de la géométrie de la réflexion ionosphérique dues aux variations de l'ionosphère d'un jour à l'autre.

Malheureusement, l'intensité de l'écho rétrodiffusé n'est pas un bon indicateur de l'affaiblissement de transmission sur un circuit de télécommunication identique, même si l'on tient compte des différences entre les antennes utilisées. Cela résulte du fait que l'intensité de l'écho rétrodiffusé dépend fortement de la présence d'irrégularités focalisantes de la couche F2 qui n'ont pas d'influence détectable sur l'affaiblissement de transmission de la liaison considérée et sur le coefficient de diffusion de la surface éclairée.

3.2 *Surveillance de la structure de l'ionosphère*

De nombreuses tentatives ont été faites pour déduire directement de la rétrodiffusion observée la structure de l'ionosphère, la connaissance de cette structure devant permettre de prévoir les conditions de propagation avec plus de précision. La méthode la plus couramment adoptée a consisté à mesurer le lieu fréquence-temps du front avant d'un écho rétrodiffusé de signal à balayage de fréquence et à en déduire la structure ionosphérique par approximations simplificatrices. Généralement ces approximations reposent sur l'hypothèse selon laquelle l'ionosphère comporte seulement une couche F, cette couche ayant d'ailleurs une forme particulière. Du Broff et autres [1979] ont décrit une méthode d'inversion de rétrodiffusion et mentionnent des documents antérieurs. Goutelard et autres [1979a] ont proposé une solution au problème général de l'inversion de l'ionogramme de rétrodiffusion: la méthode consiste, à partir d'un modèle de couche ionosphérique, simple mais suffisant pour déterminer des paramètres de transmission, à utiliser des relations analytiques qui permettent un calcul rapide des paramètres du profil. Bagwell [1978] suggère également que la structure de l'ionosphère pourrait être déterminée en utilisant des techniques faisant appel à l'effet Doppler.

Les caractéristiques du profil de la couche F obtenues par inversion de la rétrodiffusion peuvent être comparées avec les résultats fournis par les sondeurs à incidence verticale dans la région étudiée de l'ionosphère. Les résultats obtenus montrent une certaine corrélation entre les deux séries de profils mais, de l'avis général, les résultats obtenus ne justifient pas une application pratique de la méthode [Croft, 1972].

Les sources d'erreur dans les cartes des fréquences de plasma établies au moyen de la rétrodiffusion ont été étudiées par Blair et autres [1970]. L'exactitude de cette technique dépend essentiellement de l'importance des gradients d'ionisation ionosphérique, qui peuvent entraîner des erreurs sur les altitudes et les distances auxquelles sont appliquées les fréquences de plasma estimées. L'effet de ces gradients peut être corrigé, tout au moins en partie, en mesurant les retards et les angles de site par rapport à des objectifs déterminés à distance connue. L'un de ces objectifs peut être constitué par une ligne côtière, l'interface terre-mer pouvant être spécifiée au moyen de techniques faisant appel à l'effet Doppler [Blair et autres, 1969].

3.3 *Surveillance des irrégularités*

La rétrodiffusion apparaît manifestement intéressante comme moyen de surveillance des irrégularités de l'ionosphère. Des nuages d'ionisation E sporadique sont plus faciles à reconnaître car ils se comportent comme des miroirs plans localisés dans les régions basses de l'ionosphère et produisent des taches localisées de rétrodiffusion sur l'écran d'un indicateur panoramique de position (PPI). Il est aussi possible d'identifier les modes E sporadiques par leur absence de focalisation (qui caractérise les échos de la couche F au voisinage de la distance de saut [Bibl, 1960]) ainsi que par leurs angles de site [Tveten et Hunsucker, 1969]. Une fois qu'un mode E sporadique a été identifié, on peut penser à tirer parti de ses remarquables qualités en ce qui concerne les télécommunications.

Si elle est utilisée en liaison avec un échantillonnage spatio-fréquentiel portant à la fois sur le signal d'émission et sur le signal de réception [Goutelard et autres, 1979b], la rétrodiffusion permet de mettre en évidence des inhomogénéités de faible valeur du plasma ionosphérique, ainsi que certaines modifications locales de courte durée telles que les traînées ionisées créées par les météores.

Les perturbations itinérantes dans l'ionosphère provoquent des irrégularités localisées en mouvement observables dans les échos rétrodiffusés. Mais l'aspect de ces échos ne permet pas de reconnaître la nature de ces perturbations: il est nécessaire d'établir des modèles fictifs de perturbation avant de passer aux calculs, avec l'espoir de retrouver les formes observées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAGWELL, D. J. [1978] Doppler processing of HF back-scatter radar and mode structures of ionospheric propagation. IEE Conf. Proc. No. 169, Part 2, 56-59.

BIBL, K. [1960] Experimental proof of focussing at the skip distance by backscatter records. *Proc. IRE*, Vol. 48, 956-957.

BLAIR, J. C., MELANSON, L. L. et TVETEN, L. H. [1969] HF-ionospheric radar ground-scatter map showing land-sea boundaries by a spectral-separation technique. *Electron. Lett.*, Vol. 5, **4**, 75-76.

BLAIR, J. C., HUNSUCKER, R. D. et TVETEN, L. H. [1970] Ionospheric mapping by backscatter. *Ionospheric Forecasting.* Ed. V. Agy, AGARD Conf. Proc. No. 49, Paper 17.

CROFT, T. A. [1972] Sky-wave backscatter: a means of observing our environment at great distances. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, **1**, 73-156.

DU BROFF, R. E., RAO, N. N. et YEH, K. C. [1979] Backscatter inversion in a spherically symmetric ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 14, **5**, 837-842.

FENWICK, R. B. [1962] A test of the frequency-shift-pulse backscatter sounding technique in short-wave broadcasting. Final Rep. Contract IA-8513, 72 Stanford Electronic Lab., Stanford University, Stanford, Cal., Etats-Unis d'Amérique.

GOUTELARD, C., CARATORI, J., COATANHAY, J. L. et ROLLAND, R. [1979a] Application de la technique backscatter aux prévisions de transmission ionosphériques à très court terme. AGARD Conf. Proc. No. 244, *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*, Paper No. 14. Ed. A. N. Ince. NASA Accession No. N79-10299. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

GOUTELARD, C., CARATORI, J. et JOISEL, A. [1979b] Technique de sondage électromagnétique par échantillonnage spatio-fréquentiel des signaux de réception. Applications à l'étude des inhomogénéités du plasma ionosphérique. AGARD Conf. Proc. No. 244, *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*, Paper No. 13. Ed. A. N. Ince. NASA Accession No. N79-10299. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

TCHERNOV, Y. A. [1971] Vozvratno-Naklonnoe Zondirovanie Ionosferi (Sondage ionosphérique par rétrodiffusion) (en russe). Sviaz, Moscou, URSS.

TVETEN, L. H. et HUNSUCKER, R. D. [1969] Remote sensing of the terrestrial environment with an HF radio high-resolution azimuth and elevation scan system, *Proc. IEEE*, Vol. 57, **4**, 487-493.

RAPPORT 249-6

SONDAGES IONOSPHÉRIQUES SOUS INCIDENCE OBLIQUE

(Programme d'études 27B/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport traite principalement d'expériences effectuées avec des équipements de sondage installés aux deux extrémités du trajet de propagation. Plusieurs constructeurs ont réalisé des équipements pouvant être utilisés à cette fin.

Les émissions d'impulsions sur une fréquence unique donnent davantage de renseignements sur les modes de propagation ionosphérique que les émissions en ondes entretenues; cependant, l'utilisation d'émissions avec balayage de fréquences ou sur des fréquences discrètes fournit des renseignements beaucoup plus nombreux et plus faciles à interpréter. Les administrations sont encouragées à mettre au point des méthodes spéciales de sondage qui soient de nature à réduire les risques de brouillage nuisible pour les autres utilisateurs du spectre. Une méthode utile est celle des ondes entretenues, avec modulation de fréquence («chirp»), pour laquelle on peut se contenter d'une puissance de crête peu élevée (quelques watts) et qui ne cause que de faibles brouillages pour les autres usagers [Fenwick et Barry, 1965].

2. Résultats des sondages en ondes décamétriques et métriques

2.1 Les théories de propagation utilisées actuellement semblent convenir au calcul de la MUF de référence pour des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. Des transmissions d'impulsions sous incidence oblique ont été effectuées au Canada [Hatton, 1961], en France [Delobeau et autres, 1955], en République fédérale d'Allemagne [Möller, 1960], au Japon [Aono, 1962], aux Etats-Unis d'Amérique [Agy et Davies, 1959; Tveten, 1961] et en Afrique [Davies et Barghausen, 1966]. Il faut noter qu'aux basses latitudes on observe des MUF d'exploitation anormalement élevées, qui sont liées, la nuit, à une diffusion dans la région F [Davies et Barghausen, 1966; Nielson et Crochet, 1974].

2.2 Pour des trajets situés à des latitudes élevées, la MUF de référence pour des distances de transmission de 2000 à 3400 km dépend généralement de la couche F1 pendant l'été [Petrie et Stevens, 1965]. Pour les trajets de grande longueur, la propagation par un bond sur la couche F2 (rayon de Pedersen) constitue le principal mode de propagation [Hagg et Rolfe, 1963] dans certaines conditions et sur une large gamme de latitudes. Toutefois, la fréquence maximale observée (MOF) peut dépendre parfois d'un mode de propagation par Es. Hunsucker et Bates [1969] ont publié une synthèse d'autres résultats de sondages effectués à des latitudes élevées.

Il faut tenir compte du coefficient de réflexion de la couche Es et des caractéristiques des ionosondes pour évaluer l'utilité de la couche Es comme réflecteur sous incidence oblique [Stevens, 1968a]. D'après des données simultanément fournies par des radars à diffusion incohérente et par des ionosondes, les fréquences maximales observées (MOF) par E sporadique peuvent atteindre 72 MHz dans la région aurorale pour des trajets à un seul bond [Hunsucker, 1975].

2.3 Kopka et Möller [1968] ont étudié le dédoublement entre les composantes magnéto-ioniques x et o, en appliquant la méthode du tracé des rayons. Ces auteurs donnent les résultats obtenus pour un trajet de 2000 km, en fonction de la latitude magnétique et de l'azimut magnétique. En général, le dédoublement magnéto-ionique est moins important pour un trajet est-ouest que pour un trajet nord-sud. Aono [1962], Davies et Barghausen [1966] ont trouvé que cet écart était à peu près égal à la valeur longitudinale de la gyrofréquence f_H sur les trajets nord-sud. Agy et Davies [1959] ont découvert qu'il y avait un écart d'environ 0,2 MHz sur un trajet est-ouest de 2400 km, et que cet écart diminuait lorsque la distance augmentait.

2.4 Une étude des amplitudes d'impulsions à des fréquences voisines de la MUF de référence, sur un trajet est-ouest de 2370 km aux Etats-Unis d'Amérique, indique que la «focalisation de la MUF de référence» ne dépasse pas en moyenne 6 dB [Davies, 1965].

2.5 On a fait des mesures par réciprocité à l'aide des méthodes par impulsions sous incidence oblique pour enregistrer le champ et les caractéristiques d'évanouissement du signal; on a observé une corrélation élevée entre les signaux à impulsions soumis à évanouissement, reçus simultanément à chaque extrémité du trajet lorsque le signal ne contient qu'une seule composante magnéto-ionique. Si les deux ondes magnéto-ioniques sont présentes et d'intensité comparable et avec des antennes horizontales pour l'émission et pour la réception, la corrélation des évanouissements est faible [Jull et Pettersen, 1964]. Des études théoriques ont permis d'expliquer ces observations et d'indiquer une méthode de correction [Budden et Jull, 1964].

2.6 On a mesuré selon la méthode des ondes entretenues, avec modulation de fréquence («chirp»), sous incidence oblique et avec balayage de fréquence, la polarisation d'échos réfléchis sur la région F; ces mesures, effectuées sur un trajet nord-sud de 1300 km et un trajet est-ouest de 1900 km, ont donné respectivement 1 rotation/MHz et 0,25 rotation/MHz comme valeurs moyennes de la rotation de polarisation. On a obtenu des valeurs plus élevées pendant les heures de nuit que pendant la journée. Ces résultats montrent que, si l'on utilise des antennes à polarisation rectiligne dans les zones tempérées, des largeurs de bande supérieures à environ 100 kHz sur les trajets nord-sud ou supérieures à 400 kHz sur les trajets est-ouest entraîneront une distorsion de l'enveloppe des signaux [Epstein, 1969].

2.7 Il résulte d'une expérience conduite en 1970 et 1971 entre le Japon et l'Australie, sur des trajets de 5873 km [Kuriki et autres, 1974] et de 7374 km [Tanohata et autres, 1975], que le mode de propagation dominant comporte deux réflexions sur la région-F et une réflexion intermédiaire à la surface de la Terre (mode 2F). Cependant, entre environ 10 h 00 et 20 h 00 (heure locale), des signaux ont souvent été reçus à des fréquences supérieures à la fréquence maximale observée pour le mode 2F. Ces effets se manifestaient pendant 40% environ de chaque heure d'observation et la MOF de ce mode était de 4 ± 2 MHz supérieure à la MOF du mode 2F qui se propageait en même temps.

2.8 On a relevé en URSS, sur cinq trajets de longueur comprise entre 1000 km et 10 000 km, les fréquences maximales et minimales observées (MOF et LOF), ainsi que les parties du spectre où la propagation par trajets multiples était minimale et les modes de propagation actifs [Smirnov, 1972]. Pour une ionosphère calme, la MOF dépassait généralement de 10 à 35% la MUF de référence, laquelle était calculée selon la méthode de prévision pratiquée en URSS [Joulina et autres, 1969]. L'augmentation de la MOF causée par la dispersion atteignait 10% environ. Pendant les périodes de perturbation magnétique, la MOF était inférieure à la MUF de référence, alors que la LOF s'élevait. D'autres études ont été effectuées [Rose et autres, 1978] en utilisant les valeurs médianes horaires de la MOF pour 132 mois-trajets.

2.9 Les résultats de sondages par impulsions avec balayage de fréquence montrent que l'étalement des temps de propagation dû à la propagation par trajets multiples décroît à mesure qu'augmente le rapport K (fréquence de travail/MUF de référence). Des données numériques sont présentées, pour un certain nombre de trajets, par Davies [1965]. Des mesures effectuées en République populaire de Chine [Chen et Zhou, 1984] sur un trajet de 1340 km montrent que pour $K \leqslant 1$, l'étalement moyen décroît selon une loi parabolique quand K augmente, avec un minimum pour $K = 1$; pour $K > 1$, jusqu'à la MUF d'exploitation, l'étalement moyen demeure inchangé. L'analyse théorique [Dai, 1985] montre que pour une valeur donnée de K, l'étalement a une distribution à peu près normale et que l'«espérance mathématique» et la variance varient en fonction de la valeur de K. Cela a été confirmé par les mesures ci-dessus mentionnées.

2.10 Des expériences de propagation effectuées au cours de la période novembre-décembre 1981 le long d'un arc de grand cercle du nord au sud, sur une distance de 11 000 km, montrent que la largeur de la gamme de fréquences pour la propagation à un seul mode est maximale pour une distance de propagation d'environ 2000 à 3500 km, puis décroît progressivement lorsque la distance augmente. La propagation à un seul mode sur des distances supérieures à environ 8000 km est difficile à identifier, de nombreux modes complexes apparaissant à la même fréquence [Ichinose et autres, 1985].

2.11 Des expériences de propagation à longue distance avec des ionosondes obliques numériques ont permis de mesurer la polarisation, l'amplitude, la phase, le déplacement de fréquence par effet Doppler et l'angle d'incidence [Reinisch et autres, 1985].

2.12 Des mesures de MUF sur des circuits en ondes décamétriques ont été effectuées au nord-est des Etats-Unis d'Amérique pendant une période d'activité solaire maximale et les données expérimentales concordent bien avec les valeurs prévues à l'aide des programmes de prévision ITS-78 et IONCAP [Teters et autres, 1983; Millman et Swanson, 1985].

3. Angles d'arrivée

Il peut y avoir des différences sensibles entre les résultats observés, si les calculs sont faits sur la base de modèles théoriques simples. On peut améliorer la concordance en tenant compte, dans la méthode du tracé des rayons, des gradients de densité électronique [Röttger, 1967]. Aux Etats-Unis d'Amérique, on a mis au point une technique pour mesurer les angles de site et d'azimut de signaux émis en sondage oblique [Sherril et autres, 1972]: cette technique permet d'obtenir des renseignements très détaillés sur les structures ionosphériques irrégulières, par exemple pour distinguer la réfraction classique, la diffusion, la propagation en dehors d'un arc de grand cercle, la propagation guidée ou la propagation le long d'une corde. Aux latitudes élevées, des modes de propagation qui ne suivent pas le grand cercle peuvent parfois prédominer sur les circuits à ondes décamétriques [Hunsucker et Bates, 1969].

4. Application des résultats à des liaisons réelles en ondes décamétriques

Les applications opérationnelles des sondages sous incidence oblique en ondes décamétriques sont traitées par la Commission d'études 3 (voir Rapport 357). Les sondeurs obliques constituent le type le plus répandu de systèmes d'évaluation des voies en temps réel de classe I (voir le Rapport 889). Les résultats des études de sondages sous incidence oblique ont montré quels équipements utilisés à cet effet peuvent être mis en œuvre en parallèle avec des systèmes de radiocommunication en vue de déterminer les fréquences de travail optimales à court terme. On a effectué un certain nombre d'études en vue de déterminer les améliorations qui pourraient résulter de l'emploi des données obtenues par sondages obliques [Probst, 1968; Stevens, 1968b; Slutz et autres, 1969].

On est parvenu à améliorer les radiocommunications lors de mauvaises conditions de propagation, en choisissant avec soin les fréquences de travail disponibles quand les prévisions ou les programmes d'utilisation de ces fréquences n'étaient pas assez précis [Jull et autres, 1962].

On a constaté que les données fournies par les sondages sous incidence oblique pouvaient grandement faciliter l'évaluation de la qualité de fonctionnement d'un système de radiocommunication. Si la propagation ne constitue plus une inconnue, il est plus facile de découvrir les défauts ou les limitations d'un tel système.

Toutefois, des expériences mettant en œuvre des sondages ionosphériques sous incidence oblique font apparaître un certain nombre de difficultés lorsque l'équipement de sondage est utilisé en parallèle avec l'équipement de radiocommunication, ou lorsque le sondage est effectué avec l'équipement de radiocommunication. Il faut tenir compte des points suivants:

- différences éventuelles de sensibilité entre les équipements de radiocommunication et de sondage;
- erreurs commises lorsqu'on effectue le sondage sur un trajet ionosphérique distinct du trajet de radiocommunication (notamment si les résultats de sondage sont utilisés pour des prévisions quantitatives des niveaux des signaux). Certaines études [Jull, 1968] donnent à penser que si les deux trajets sont séparés par 32 km, l'écart quadratique moyen entre les niveaux des signaux atteint 5 dB dans le cas où les résultats de sondage correspondent à une moyenne calculée sur 8 min;
- la non-réciprocité ionosphérique entraîne des différences entre les niveaux des signaux se propageant en sens opposé entre des antennes linéaires. La non-réciprocité de trajet que l'on constate en présence d'évanouissements par polarisation peut être sensiblement réduite si l'on prend la moyenne des niveaux des signaux sur 8 min [Jull, 1968];
- différences éventuelles entre les performances des équipements de sondage et de radiocommunication, en présence de brouillage;
- difficultés pour déterminer la cadence de répétition des sondages nécessaires pour garantir la validité des résultats lorsque les conditions ionosphériques commencent à varier, par exemple pendant les périodes perturbées;
- difficulté pour déterminer un signal de sondage qui soit représentatif de la modulation utilisée dans le système de radiocommunication;
- la courbure provoquée par la troposphère sur le trajet de propagation des ondes décamétriques aux petits angles de site tend à faire diminuer la hauteur vraie de la réflexion et généralement à augmenter sa hauteur virtuelle [Millman, 1975]. Dans certaines conditions géophysiques, il se pourrait toutefois que la distance de dispersion au sol et la hauteur virtuelle de réflexion décroissent quand les réfractions troposphériques augmentent.

Les données sur le temps de propagation, nécessaires pour simuler la voie radioélectrique (voir Rapport 549) dans la conception des systèmes de communication à large bande, peuvent être obtenues à partir d'ionogrammes sous incidence oblique. Toutefois, dans quelques systèmes de sondage, la résolution du temps de propagation peut ne pas suffire à une utilisation efficace des données [Sailors et Hill, 1977].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGY, V. et DAVIES, K. [1959] Ionospheric investigations using the sweep-frequency pulse technique at oblique incidence. *NBS J. Res.*, Vol. 63D, 151-174.

AONO, Y. [1962] Study of radio wave propagation in sweep frequency pulse transmission tests in Japan. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 9, **42**, 127-200.

BUDDEN, K. G. et JULL, G. W. [1964] Reciprocity and non-reciprocity with magneto-ionic rays. *Can. J. Phys.*, **42**, 113-130.

CHEN, Y. C. et ZHOU, G. N. [1984] Dépendance en fréquence des paramètres des voies ionosphériques (en chinois). *J. Inst. Comm. Chine*, Vol. 5, **2**, 48-56.

DAI, Y. S. [1985] Voie à ondes décamétriques variable dans le temps (en chinois). Département des publications du Ministère des Postes et Télécommunications, Beijing, République populaire de Chine.

DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph 80, 181, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

DAVIES, K. et BARGHAUSEN, A. F. [1966] The effect of spread F on the propagation of radio waves near the equator. *Spread F and its effects upon radiowave propagation*, 437-466. Agardograph 95, Ed. P. Newman, Technivision Maidenhead, Royaume-Uni.

DELOBEAU, F., EYFRIG, R. et RAWER, K. [1955] Résultats expérimentaux de transmission ionosphérique d'impulsions à incidence oblique. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 10, 55-64.

EPSTEIN, M. R. [1969] Polarization of ionospherically propagated HF radio waves with applications to radiocommunications. *Radio Sci.*, Vol. 4, 53-67.

FENWICK, R. B. et BARRY, C. H. [1965] Step by step to a linear frequency sweep. *Electronics*, Vol. 38, 66-70.

HAGG, E. L. et ROLFE, W. [1963] A study of transatlantic radio propagation modes at 41.5 MHz. *Can. J. Phys.*, **41**, 220-233.

HATTON, W. L. [1961] Oblique-sounding and HF radiocommunication. *IRE Trans. Comm. Systems*, Vol. PGCS-9, 275.

HUNSUCKER, R. D. [1975] Chatanika Radar investigation of high latitude E-region ionization structure and dynamics. *Radio Sci.*, Vol. 10, 277-288.

HUNSUCKER, R. D. et BATES, H. F. [1969] Survey of polar and auroral region effects on HF propagation. *Radio Sci.*, Vol. 4, 347-365.

ICHINOSE, M., KURATANI, Y. et YAMAZAKI, I. [1985] HF propagation experiments made with a Chirp sounder aboard a ship. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 32, **136**, 61-71.

JOULINA, E. M., KERBLAÏ, T. S., KOVALEVSKAYA, E. M., et collaborateurs [1969] *Osnovy dolgosrochnogo radioprognoziro-vaniya* (Principes de la prévision radioélectrique à long terme) 172 pages. Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

JULL, G. W. [1968] HF spatial and temporal propagation characteristics and sounding assisted communications. *Ionospheric Radio Communications*, 225-241. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.

JULL, G. W., DOYLE, D. J., IRVINE, G. W. et MURRAY, J. P. [1962] Frequency sounding techniques for HF communications over auroral zone paths. *Proc. IRE*, Vol. 50, 1676-1682.

JULL, G. W. et PETTERSEN, G. W. E. [1964] Origin of non-reciprocity on high frequency ionospheric paths. *Nature*, Vol. 201, 483-484.

KOPKA, H. et MÖLLER, H. G. [1968] MUF calculations including the effect of the earth's magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 3, 53-56.

KURIKI, I., KASUYA, I., HOJO, H. et TANOHATA, K. [1974] Analysis of maximum observed frequencies on oblique ionograms by ray tracing technique. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 21, 161-190.

MILLMAN, G. [1975] Refraction effects on magnetic field geometry and HF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 751-760.

MILLMAN, G. H. et SWANSON, R. W. [1985] Comparison of HF oblique transmissions with ionospheric predictions. *Radio Sci.*, Vol. 20, **3**, 315-318.

MÖLLER, H. G. [1960] Ergebnisse der Impulsübertragung mit veränderlicher Frequenz auf der Strecke Sodankylä-Lindau (Résultats de transmissions d'impulsions à fréquence variable sur le trajet Sodankylä-Lindau). *Kleinheubacher Berichte*, **7**, 115-123.

NIELSON, D. L. et CROCHET, M. [1974] Ionospheric propagation of HF and VHF radio waves across the geomagnetic equator. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 688-702.

PETRIE, L. E. et STEVENS, E. E [1965] An F1 layer MUF prediction system for northern latitudes. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 542-546.

PROBST, S. E. [1968] The CURTS concept and current state of development. *Ionospheric Radio Communications*, 370-379. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

REINISCH, B. W., BIBL, K., AHMED, M., SOICHER, H., GORMAN, F. J. et JODOGNE, J. C. [1985] Multipath and Doppler observations during transatlantic digital HF propagation experiments, Propagation influences on digital transmission systems – problems and solutions. AGARD Conf. Proc. No. 363, *Propagation Influences on Digital Transmission.* Ed. J. H. Blythe. NASA Accession No. N85-19269. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

ROSE, R. B., MARTIN, J. N. et LEVINE, P. H. [1978] MINIMUF-3: A simplified HF MUF prediction algorithm. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. 186, NTIS Accession No. AD A0522052. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

RÖTTGER, J. [1967] Messung des Erhebungswinkels von Kurzwellen bei schrägem Einfall in die Ionosphäre (Mesure de l'angle de rayonnement sur ondes décamétriques à incidence oblique dans l'ionosphère). Thèse de l'institut de géophysique et de météorologie de l'Ecole supérieure technique de Brunswick.

SAILORS, D. B. et HILL, J. R. [1977] Simulation and measurement of the HF channel. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. 111, NTIS Accession No. A043384. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

SHERRILL, W. M., GREEN, T. C. et MARTIN, P. E. [1972] Interferometric direction finding on an FM/CW ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 7, 251-256.

SLUTZ, R. J., GAUTIER, T. N. et LEFTIN, M. [1969] Short-term radio propagation forecasts in Southeast Asia, ESSA Tech. Rep., ERL-97-ITS-72. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

SMIRNOV, V. B. Ed. [1972] Naklonnoe zondironavie ionosfery (Sondage ionosphérique sous incidence oblique). Collection d'articles, N° 1, publiée par Gidrometizdat, Léningrad, URSS.

STEVENS, E. E. [1968a] The significance of sporadic E propagation in determining the MUF. *Ionospheric Radio Communications*, 289-293. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

STEVENS, E. E. [1968b] The CHEC sounding system. *Ionospheric Radio Communications*, 359-369. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

TANOHATA, K., YAMAOKA, M., NAKAJIMA, M., SAKAMOTO, T., IGUCHI, M. et YAMASHITA, K. [1975] Some consideration of maximum observed frequencies on the path between St. Kilda and Yamagawa. *Rev. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 21, 33-41.

TETERS, L. R., LLOYD, J. L., HAYDON, G. W., et LUCAS, D. L. [1983] Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel – ionospheric communications analysis and prediction program user's manual. NTIA Report 83-127. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

TVETEN, L. H. [1961] Long-distance one-hop F1 propagation through the auroral zone. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 1683-1684.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 6L: FACTEURS AFFECTANT LA CONCEPTION DES SYSTÈMES

Recommandations et Rapports

RAPPORT 266-6

CARACTÉRISTIQUES DE LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE ET DU BRUIT QUI ENTRENT EN JEU LORS DE LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION DE TERRE ET DE LA PLANIFICATION DES SERVICES

(Evanouissements)

(Programme d'études 28A/6)

(1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

L'expérience a montré que des renseignements sur la valeur moyenne du signal reçu ne suffisent pas pour planifier les systèmes de radiocommunication. Il faut également considérer les variations du signal dans le temps, dans l'espace et en fréquence, que l'on groupe sous le terme général d'évanouissements. Les évanouissements ont une influence déterminante sur le fonctionnement des systèmes de radiocommunication et sur le type de modulation que l'on peut utiliser efficacement. Il est essentiel d'en connaître la profondeur et la rapidité afin de pouvoir spécifier la puissance à donner aux émetteurs, fixer les rapports de protection contre les brouillages et, si l'on connaît de plus la corrélation des champs reçus sur des antennes ou sur des fréquences différentes, déterminer les systèmes de diversité ou de codage les plus efficaces et les plus économiques. Les Rapports 413, 414 et 415 (Oslo, 1966) traitent de l'importance des évanouissements, en ce qui concerne l'utilisation des fréquences, et analysent leurs divers aspects.

2. Causes générales des évanouissements

Les évanouissements peuvent être causés par des phénomènes divers, tels que:

- le mouvement de l'ionosphère et les variations dues à la propagation par trajets multiples, provoquant des évanouissements par interférence,
- la rotation des axes des ellipses de polarisation,
- la variation de l'absorption ionosphérique dans le temps,
- la focalisation et la disparition temporaire du signal par suite d'une variation imprévue de la MUF [Davies, 1965].

Sur un trajet de transmission nord-sud de 8000 km, on a attribué les évanouissements de longue durée aux effets des ondes de gravité atmosphériques [Röttger, 1973].

Comme l'a fait observer Davies [1965], la durée du cycle d'évanouissement dépend en grande partie de la cause des évanouissements. Il s'ensuit que la durée des évanouissements dus aux interférences et à la polarisation peut se situer entre une fraction de seconde et plusieurs secondes, ceux dus à la focalisation peuvent être de l'ordre de 15 à 30 minutes, alors que les évanouissements dus à l'absorption peuvent durer plus d'une heure; les variations imprévues de la MUF sont très irrégulières, se produisant tantôt au début tantôt à la fin des évanouissements.

Des expériences visant à observer la fréquence relative des évanouissements et portant aussi bien sur des signaux réfléchis que sur des signaux diffusés par l'ionosphère ont été menées en URSS sur des trajets d'un millier de kilomètres environ [Kerblaï et autres, 1974; Kerblaï et autres, 1977; CCIR 1978-82].

Les évanouissements sont d'autant plus rapides que les fréquences sont plus élevées, car le déphasage provoqué par un mouvement donné de l'ionosphère est plus marqué pour les petites longueurs d'onde. Ce mouvement des régions ionisées donne lieu à des évanouissements sélectifs et à une distorsion de l'enveloppe de modulation du signal. Il peut en outre modifier la longueur du trajet et produire un effet Doppler sur chacune des composantes du signal.

3. Périodes d'échantillonnage

Il n'est pas toujours indispensable, quand on analyse un système de communication, d'identifier les différents phénomènes qui interviennent; on peut, au lieu de cela, observer la série «temporelle» correspondante et caractériser les fluctuations du niveau du signal dans le temps en les considérant comme un processus aléatoire ou stochastique [Brennan, 1961]. Cette interprétation de la série temporelle exige, en premier lieu, le choix d'une période d'observation T_s assez longue pour inclure un nombre suffisant de fluctuations du niveau du signal. Si le choix de la valeur de T_s est quelque peu arbitraire, il est dicté généralement par les objectifs de l'analyse. C'est ainsi que pour les trajets en ondes décamétriques et pour des évanouissements rapides, on a constaté qu'il y a intérêt à considérer des échantillons d'une durée comprise entre quelques minutes et une heure; pour estimer les variations aléatoires dans chaque période horaire moyenne d'une journée, on a utilisé des périodes d'échantillonnage d'un mois.

Il est commode de considérer séparément les évanouissements à court et à long terme. La composante d'évanouissement à court terme comprend l'interférence de phase entre les signaux transmis par propagation sur trajets multiples et les variations rapides de la puissance du signal dues aux irrégularités ionosphériques. La composante d'évanouissement à long terme résulte des variations aléatoires de la médiane à court terme du champ reçu. Par exemple, les évanouissements à long terme comprennent les variations d'un jour à l'autre de la médiane du champ mesuré pendant une heure donnée. Les variations diurnes, saisonnières et undécennales (cycle solaire) ont un caractère plus systématique et ne sont généralement pas associées aux évanouissements.

4. Profondeur et rapidité des évanouissements à court terme

Dans l'acception qui leur est donnée ici, les mots «profondeur» et «rapidité» se rapportent aux caractéristiques des variations de l'amplitude du signal reçu lorsque l'émission est stable en amplitude et en fréquence.

4.1 *Profondeur des évanouissements*

La fonction de distribution de l'amplitude du signal $P(v_0)$ généralement utilisée donne la probabilité pour que l'on trouve une amplitude v du signal supérieure à une valeur v_0. Elle est liée à la fonction de densité de probabilité $p(v)$ par la relation:

$$P(v_0) = \int_{v_0}^{\infty} p(v)\, dv \qquad (1)$$

Les fonctions de densité de probabilité, que l'analyse fournit pour décrire l'enveloppe d'un signal sujet à des évanouissements, diffèrent selon les hypothèses faites relativement à la structure des éléments constituants du signal. Dans un des modèles les plus fréquemment utilisés, on admet que le signal reçu avant détection se compose d'une composante sinusoïdale stable et d'une composante de Rayleigh aléatoire avec une densité de probabilité de phase uniforme [McNicol, 1949; Bramley, 1951]. On aboutit à la fonction de densité de probabilité de Nakagami-Rice [Nakagami, 1943; Rice, 1944 et 1945]:

$$p(v) = (2\,v/v_n^2) \exp\left[-(v_1^2 + v^2)/v_n^2\right] I_0\,(2v_1\,v/v_n^2) \qquad (2)$$

dans laquelle:

$I_0(x)$: fonction de Bessel d'ordre zéro modifiée,

v : (tension d'enveloppe du signal reçu)/$\sqrt{2}$,

v_1 : valeur efficace de la tension de la composante sinusoïdale stable,

v_n : valeur efficace de la composante de tension aléatoire.

La Fig. 1 donne la fonction de distribution de l'amplitude du signal correspondante $P(v_0)$. Chaque courbe représente une probabilité constante $P(v_0)$ pour que le niveau v_0 (porté en ordonnée) soit dépassé. En abscisse est porté le rapport v_n/v_1, paramètre nécessaire pour spécifier une distribution particulière de Nakagami-Rice. Par exemple, si le rapport de la tension aléatoire efficace à la tension stable efficace est égal à l'unité (soit 0 dB), un niveau inférieur de 7,5 dB à la médiane sera dépassé pendant 90% du temps.

Si $v_n/v_1 \gg 1$, l'expression (2) se ramène à la fonction de densité de Rayleigh:

$$p(v) = (2v/v_n^2) \exp\,(-v^2/v_n^2) \qquad (3)$$

Or, la Fig. 1 montre que la distribution réelle est très voisine de la distribution de Rayleigh à condition que $v_n/v_1 > 2$ (6 dB).

Si $v_n/v_1 \ll 1$, et au voisinage de $v = v_1$, l'expression (2) se ramène à la fonction de distribution normale (Gauss):

$$p(v) = \frac{1}{v_n\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(v - v_1)^2}{v_n^2}\right] \qquad (4)$$

Le signal varie donc symétriquement par rapport à la médiane v_1 avec un écart type $v_n/\sqrt{2}$. La Fig. 1 montre que la distribution est presque symétrique par rapport à la médiane, à condition que $v_n/v_1 < 0{,}1$ (−20 dB); on peut donc estimer que, si cette condition est satisfaite, la distribution est approximativement normale.

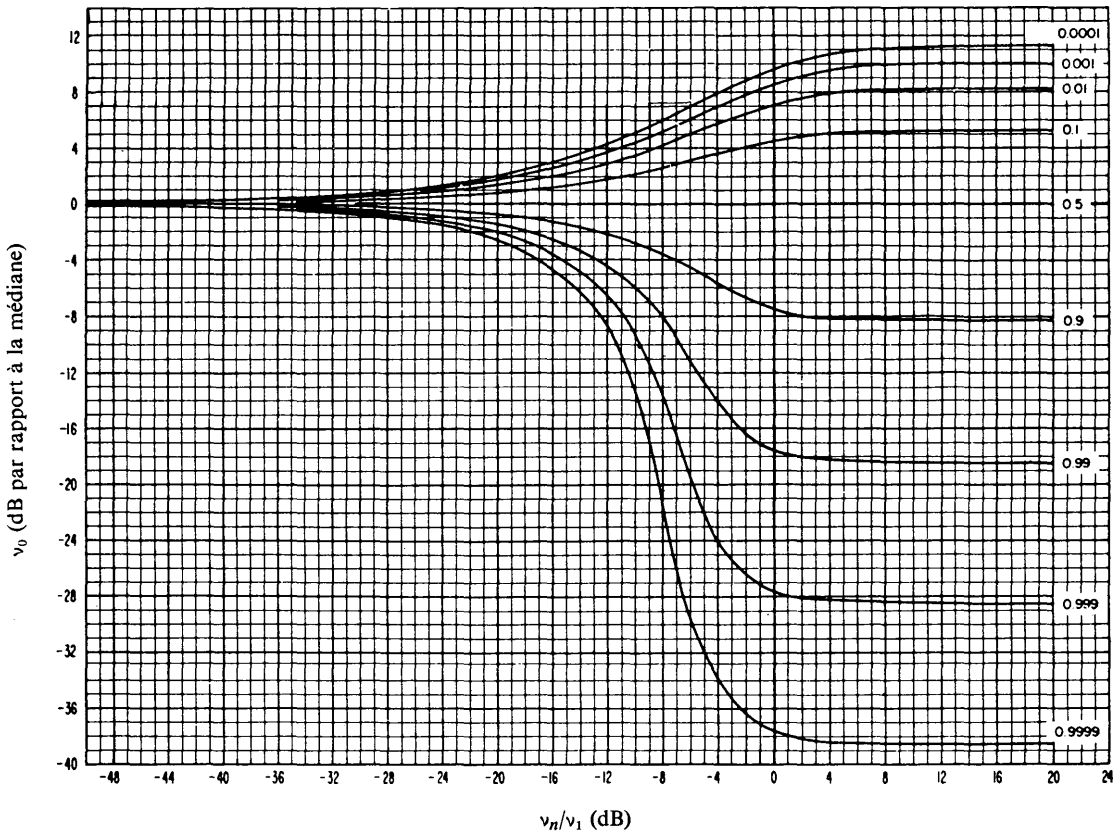


FIGURE 1 – *Fonction de distribution P (v_0) pour la distribution de Nakagami-Rice*

(Les valeurs de $P(v_0)$ sont indiquées sur les courbes)

Quand l'intensité du signal est exprimée en décibels par rapport à un niveau spécifié, la distribution indiquée dans la formule (4) s'appelle distribution log-normale. Les fonctions de densité de probabilité normale et log-normale peuvent être exprimées l'une et l'autre par la même formule:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \tag{5}$$

Dans le cas de la distribution normale, x est égal à $(v - v_m)$ tandis que dans la distribution log-normale en dB, x est égal à 20 log (v/v_m), v_m étant la médiane de v, et σ_x, l'écart type de x.

En plus des densités de probabilité ci-dessus, qui sont liées à certaines hypothèses théoriques (phénomènes stationnaires, mouvement aléatoire des éléments rayonnants secondaires), il en est d'autres qui méritent d'être considérées parce qu'elles contiennent des paramètres arbitraires auxquels on peut fixer des valeurs telles que les fonctions de distribution représentent bien les résultats expérimentaux. On peut, à cet égard, signaler la distribution en m [Nakagami, 1960] qui est analogue à la distribution en χ^2 et à la distribution gamma, souvent employées dans les statistiques. La distribution en m est voisine d'une distribution de Rice quand m est grand et d'une distribution de Rayleigh quand m est voisin de l'unité.

La façon la plus simple de caractériser des distributions empiriques du signal est de recourir à la statistique, qui donne une indication sur l'occurrence des niveaux spécifiés. Comme dans la Fig. 1, on peut caractériser une distribution en spécifiant les niveaux dépassés pendant plusieurs pourcentages de temps spécifiés.

Le Tableau I donne ces niveaux pour les distributions théoriques étudiées plus haut [Norton et autres, 1955].

TABLEAU I

Distribution	Niveau (dB) par rapport à la médiane, dépassé pendant le pourcentage de temps suivant			
	1%	10%	90%	99%
Rayleigh	8,22	5,21	−8,18	−18,39
Nakagami-Rice				
$v_1 = v_n$	7,02	4,48	−7,53	−17,55
$v_1 = 3{,}16\ v_n$	3,54	2,12	−2,80	−5,98
Normale et logarithmique normale	$2{,}326\sigma_x$	$1{,}282\sigma_x$	$-1{,}282\sigma_x$	$-2{,}326\sigma_x$

Dans l'étude de la propagation des ondes radioélectriques, on connaît souvent la valeur mensuelle médiane de l'amplitude du signal, mais il faut connaître en outre la distribution de probabilité de la valeur instantanée de cette amplitude. Les valeurs médianes de l'amplitude du signal, exprimées en décibels, pendant un intervalle de temps spécifié (par exemple, 1 h) sur une série de jours, sont normalement distribuées avec un écart type σ dB. C'est-à-dire que ces valeurs médianes sont log-normales. Si la distribution des valeurs instantanées par rapport à la valeur médiane pendant chaque intervalle de temps particulier est une distribution de Rayleigh, on peut calculer la distribution de probabilité totale pour tous les intervalles de temps d'après ces deux distributions [Spaulding, 1982]. La Fig. 2 [Picquenard, 1974] indique le niveau au-dessous duquel tombe le signal pendant des pourcentages donnés du temps total, pour des valeurs de σ allant jusqu'à 20 dB. Dans le cas de la propagation sans brouillage de l'onde ionosphérique, on peut calculer la valeur de σ à l'aide de la formule de $\sigma_{S\text{-}N}$ de Sailors et autres [1977]. Si le rapport signal/bruit est élevé en présence de brouillage, la formule de $\sigma_{S\text{-}N}$ due aux mêmes auteurs permet de calculer la valeur de σ.

Le rapport [Spaulding, 1982] présente des algorithmes de calcul permettant de déterminer la distribution totale des évanouissements d'amplitude pour un signal composé d'un ou plusieurs signaux dont, pour chacun, la médiane horaire de l'évanouissement à court terme a une distribution de Rayleigh tandis que celle de l'évanouissement à long terme a une distribution log-normale.

Des mesures effectuées dans la bande 6 [Spaulding, 1982] semblent montrer que les médianes horaires du champ pour une heure de nuit donnée sont, d'un jour à l'autre, distribuées selon une loi log-normale, tandis que l'évanouissement à court terme, à l'intérieur d'une heure, peut s'écarter de la distribution couramment admise comme étant une distribution de Rayleigh.

Les propriétés de la distribution du champ de l'onde ionosphérique dans les bandes 6 (ondes hectométriques) et 5 (ondes kilométriques) montrent que la distribution log-normale et celle de Rayleigh ne s'appliquent que dans des cas marginaux et que les enregistrements effectués pendant 30 et 60 min, durant plusieurs années et à différentes saisons, suivent une loi de distribution différente [Täumer et Sulanke, 1967 et 1968].

Un examen critique des renseignements contenus dans les documents du CCIR et dans d'autres publications ainsi que de nouvelles analyses des données disponibles effectuées au Royaume-Uni ont permis de dégager les valeurs des écarts des déciles du champ par rapport à ses valeurs médianes, ces écarts étant dus à la variabilité au cours d'une heure. Les résultats sont les suivants: pour le décile inférieur, l'écart par rapport à la médiane horaire est d'environ 6 dB, alors que, pour le décile supérieur, il est d'environ 5 dB, ce qui conduit à penser que la distribution du champ est en gros plus proche d'une distribution log-normale que d'une distribution de Rayleigh ou de Nakagami-Rice.

Après cet exposé de quelques formules mathématiques qui peuvent servir à décrire l'évanouissement, on présentera quelques résultats de mesure. Avec de courts intervalles d'analyse (3 à 7 min), ce sont des fonctions de distribution voisines de la distribution de Rayleigh qui semblent prépondérantes. En revanche, avec des intervalles d'analyse plus longs (30 à 60 min), la distribution semble suivre la loi logarithmique normale plutôt que celle de Rayleigh. La dynamique d'évanouissement est souvent définie par la différence (dB) entre les niveaux du signal qui sont dépassés pendant 10% et 90% du temps, et l'on a indiqué pour des trajets en ondes décamétriques à grande distance les valeurs 13 ± 3,2 dB [Grosskopf, 1953] et 16,6 ± 3,2 dB [Konopleva, 1964]. Il ne semble pas que, sur des trajets d'une longueur comprise entre 1500 et 6000 km, l'intervalle de variation dépende beaucoup de la longueur du trajet, de l'heure ni de la saison [Konopleva, 1964]. Il est intéressant de noter que, si les distributions mesurées peuvent avoir une allure différente de celle de la distribution de Rayleigh, la dynamique

d'évanouissement observée est du même ordre de grandeur que la valeur 13,4 dB prévue pour la distribution de Rayleigh. Toutefois, on a constaté que pour des signaux de niveau élevé cet intervalle s'abaisse en dessous de la valeur de Rayleigh, peut-être à cause de la présence d'une composante constante importante due à une réflexion spéculaire; dans ces conditions, ce sont des distributions du type Nakagami-Rice qui se manifestent. Les écarts des déciles de médianes de 2 à 10 min par rapport à la médiane horaire ont aussi été étudiés en URSS. Pour des liaisons radioélectriques fonctionnant à $f/\text{MUF} \leqslant 0{,}85$, ces écarts sont de 5 à 7,5 dB aux latitudes moyennes et de 6,5 à 10 dB aux latitudes septentrionales [Kosikov, 1957; Khmelnitsky, 1975]. Des études ont montré que le taux de fluctuation au cours d'une moyenne intra-horaire par rapport à la médiane horaire dépend de la durée d'intégration. Pour une liaison de 3000 km de longueur en latitude moyenne, l'écart décile par rapport à la médiane horaire est de 6, 5 et 2 dB pour des périodes d'intégration respectives de 1, 2 et 15 min [Malygin et Sergueev, 1982; Sergueev et autres, 1985].

Les données relatives aux bruits atmosphériques se trouvent dans le Rapport 322. Elles proviennent de mesures normalisées faites dans les stations d'un réseau mondial, les valeurs moyennes ayant été déterminées pour une période d'un quart d'heure chaque heure, prise comme représentative de l'heure pendant laquelle elles ont été faites. L'hypothèse sur laquelle repose le programme de mesure est la suivante: à l'exception des périodes de transition (aube et crépuscule) et des périodes d'orages locaux, il n'y a, en général, aucune variation significative du bruit au cours d'une heure.

Des renseignements relatifs aux bruits radioélectriques artificiels se trouvent dans le Rapport 258. La puissance moyenne de bruit y est indiquée, en fonction de la fréquence, pour plusieurs catégories de milieux (quartiers des affaires, quartiers résidentiels, zones rurales), accompagnée des écarts des déciles correspondants par rapport à la moyenne horaire du champ, ces écarts étant dus à la variabilité au cours d'une heure en un endroit donné. Le Tableau II fait connaître les valeurs du décile supérieur qui conviennent pour les ondes décamétriques. S'il est vrai que la variabilité est un peu plus faible pour les zones rurales à la fréquence 5 MHz, les autres résultats diffèrent peu entre eux. La médiane de toutes ces valeurs est 10,0 dB; c'est d'ailleurs aussi la médiane pour les quartiers résidentiels.

TABLEAU II – *Ecarts du décile supérieur par rapport à la médiane horaire du champ pour les bruits artificiels (dB)*

Fréquence (MHz)	Catégorie de milieu		
	Quartier des affaires	Quartier résidentiel	Zone rurale
5	11,0	10,0	5,9
10	10,9	8,4	9,0
20	10,5	10,6	7,8

4.2 *Rapidité des évanouissements*

La rapidité des évanouissements peut être caractérisée de diverses manières [McNicol, 1949; Ratcliffe, 1956; Price, 1957; Rice, 1958]. Une description des évanouissements, qui peut être utile dans un certain nombre d'applications, est donnée par la fonction d'autocorrélation dans le temps ou par le spectre de puissance correspondant.

Moyennant certaines hypothèses théoriques (répartition normale des composantes de vitesses des éléments rayonnants secondaires), la fonction d'autocorrélation devrait être représentée par une courbe normale:

$$R(\tau) \approx R(0) \exp\left(-\tau^2/2\tau_0^2\right) \qquad (6)$$

où τ_0 s'appelle constante de temps de corrélation (ou de cohérence) de la voie sujette à évanouissement. La densité spectrale de puissance correspondante est proportionnelle à $\exp\left(-\tau_0^2 f^2/2\right)$, fonction d'allure gaussienne dont l'écart type est $1/\tau_0$. Cette fonction porte aussi le nom de largeur de bande de corrélation (ou de cohérence) de la voie sujette à évanouissement.

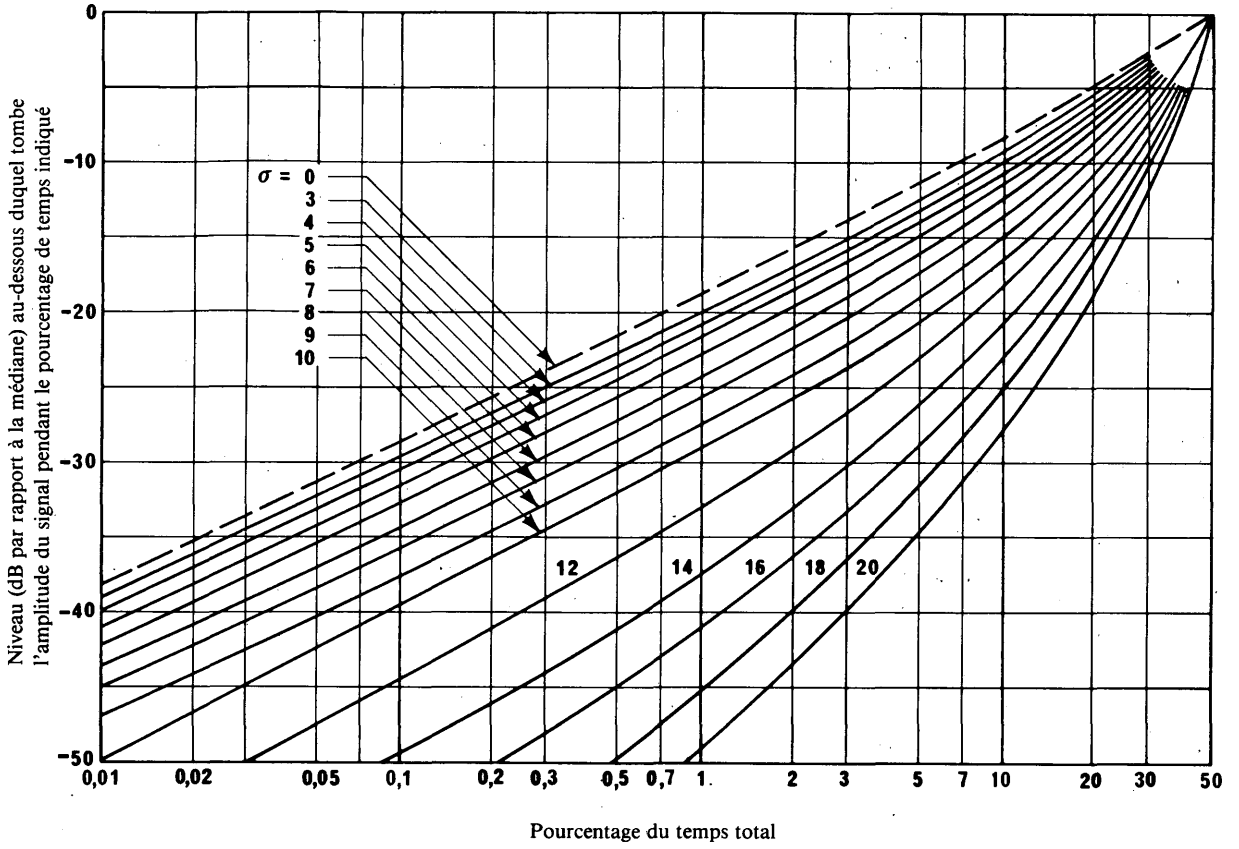


FIGURE 2 – *Niveau au-dessous duquel tombe l'amplitude du signal quand la distribution des valeurs instantanées de l'amplitude du signal est une distribution de Rayleigh, mais que la distribution des valeurs journalières médianes de l'amplitude du signal est une distribution log-normale, avec un écart-type de σ dB*

On peut toutefois se demander si l'hypothèse faite sur la répartition des vitesses des éléments rayonnants secondaires est toujours justifiée. Il convient donc de prendre en considération la possibilité d'autres fonctions de répartition des vitesses. Ces dernières peuvent conduire à d'autres formes de la fonction d'autocorrélation et à des étalements différents par effet Doppler.

On a souvent utilisé d'autres paramètres pour caractériser la rapidité des évanouissements, tout d'abord la fréquence des évanouissements définie par le nombre de fois où le champ traverse une certaine valeur spécifiée, dans le sens ascendant, pendant une unité de temps.

Lorsque les évanouissements du signal obéissent à l'équation (2), la rapidité d'évanouissement définie par le passage au niveau ν est donnée par:

$$N(\nu) = (f_n \nu \sqrt{4\pi}/\nu_n) \exp[-(\nu_1^2 + \nu^2)/\nu_n^2] I_0(2\nu_1 \nu/\nu_n^2) \quad (7)$$

où

f_n : moyenne quadratique de la fréquence des évanouissements, donnée par:

$$f_n^2 = \frac{\int_0^\infty f^2 G(f)\, df}{\int_0^\infty G(f)\, df} = \frac{1}{4\pi^2 R(0)} \left.\frac{d^2 R(\tau)}{d\tau^2}\right|_{\tau = 0} \quad (8)$$

Dans l'expression (8), $R(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation, $G(f)$ est le spectre de puissance des évanouissements et f est mesuré à partir de la fréquence centrale de la bande [Rice, 1948].

Dans le cas particulier de la distribution de Rayleigh, on peut introduire la valeur médiane ν_m, d'où [Rice, 1958]:

$$N(\nu) = 2{,}95\, f_n\, (\nu/\nu_m) \exp\,(-0{,}693\, \nu^2/\nu_m^2) \qquad (9)$$

dans laquelle, si $\nu = \nu_m$, $N(\nu_m) = 1{,}47\, f_n$. On peut obtenir des résultats similaires à ceux-ci pour différentes distributions de l'évanouissement du signal, telles que les distributions normale ou log-normale (formule (5)). L'important est que $N(\nu_m)$ soit proportionnel à f_n.

La fréquence des évanouissements, définie par le passage au niveau du champ dépassé pendant 90% du temps, a fait l'objet de mesures en République fédérale d'Allemagne (enregistrement du champ de la station WWV sur 15 MHz). La fréquence d'évanouissement était comprise entre 6 et 16 par minute, la valeur moyenne étant de 11,25 par minute.

La rapidité des évanouissements du signal en raison de brouillages dépend des caractéristiques des modes de propagation qui, à leur tour, sont déterminées dans une large mesure par le rapport entre la fréquence de travail et la fréquence maximale utilisable [Sergueev, 1974, 1975; Malygin et autres, 1982]. Des données expérimentales sur des trajets de longueur allant jusqu'à 3000 km, à des latitudes moyennes donnent des périodes de corrélation des évanouissements τ_0 comprises entre 2 et 18 s selon la fréquence de travail et la saison [CCIR, 1982-86a]. Les valeurs les plus faibles sont obtenues lorsque les rayons empruntent des trajets multiples (par exemple, dédoublement magnéto-ionique ou présence du rayon de Pedersen). Sur des trajets à plusieurs bonds sur une distance allant jusqu'à 6000 km, avec une structure complexe du trajet du signal, on obtient une valeur τ_0 = 3-4 s, indépendante de la fréquence de travail.

Dans les régions tropicales, certains trajets en ondes décamétriques peuvent subir, pendant un pourcentage de jours déterminé, des évanouissements beaucoup plus rapides que d'autres trajets situés à des latitudes plus élevées [Osborne, 1952; Yeh et Villard, 1958; Bennington, 1960; Koster, 1963]. Ce phénomène est lié à la diffusion par la couche F équatoriale; il commence habituellement vers 20h00 (heure locale) et dure environ de 2 à 4 heures. On peut s'attendre à ce qu'il affecte les trajets de transmission dont le point de réflexion sur la couche F est situé entre les latitudes magnétiques ± 15°. On constate des variations saisonnières ainsi que des variations dues à l'activité solaire, mais elles peuvent être de nature différente selon l'orientation du trajet. Les trajets de grande longueur semblent davantage affectés à l'époque des équinoxes et au moment du maximum de l'activité solaire [Humby, 1959]. En plus de l'augmentation de la profondeur des évanouissements, on a observé de brèves variations de fréquence de l'ordre de 20 à 30 Hz; ces variations peuvent affecter une fréquence inférieure sans qu'il en soit de même pour une fréquence supérieure [Davies et Barghausen, 1964]. Il faudrait disposer d'un plus grand nombre de données pour pouvoir déterminer avec davantage de précision les diverses caractéristiques des évanouissements.

5. Variations à long terme

Dans le cas de variations à long terme, on analyse généralement la composante erratique en prenant les valeurs médianes horaires et en évaluant les distributions d'amplitude sur une longue période. On admet d'ordinaire, pour simplifier, que les variations à long terme ont une distribution log-normale et cette méthode donne souvent une bonne approximation de la distribution réelle. Une étude très complète des variations à long terme effectuée en République fédérale d'Allemagne [Grosskopf, 1953; 1955a; 1955b] a montré que les courbes de distribution correspondant à une rotation solaire étaient proches de la loi log-normale pour 50% des 28 périodes de rotation étudiées; 25% pouvaient se partager en deux populations à distribution log-normale valable chacune pour une gamme donnée de champs. Les autres ne pouvaient se ramener à la distribution log-normale que par un partage en un nombre plus élevé de population partielles.

Les résultats relatifs à la dispersion des variations à long terme ont été étudiés dans un certain nombre de pays. Exprimées sous forme de l'écart type σ_x de la distribution log-normale (équation (5)), les analyses mentionnées ci-dessus ont donné un résultat moyen de 8 dB, certaines indications montrant que, pendant la nuit, les valeurs peuvent être plus grandes que pendant le jour. Des expériences ont été faites en URSS sur des trajets à ondes décamétriques de 1500, 3000 et 6000 km, en toutes saisons et à toutes les heures du jour; les valeurs obtenues étaient comprises entre 5 et 10 dB [Konopleva, 1964]. Les variations systématiques de caractère saisonnier ou correspondant aux heures du jour et de la nuit paraissent relativement faibles. Les résultats obtenus au Royaume-Uni pour les trajets Accra-Royaume-Uni, Bombay-Royaume-Uni et Colombo-Royaume-Uni ont donné des valeurs de l'ordre de 5,5 à 7 dB. Dans certaines régions, on peut trouver des valeurs plus élevées; par exemple, il se peut que l'on obtienne une valeur de 10 dB ou plus pour des trajets traversant les régions polaires à forte absorption.

Des études de Bradley et Vernon [1982], fondées sur des travaux théoriques, ainsi qu'un examen des résultats de mesure conduisent à penser que l'influence de la latitude sur les écarts des déciles l'emporte sur celle de la fréquence. Les auteurs ont montré que certains résultats sont mutuellement incompatibles: dans certaines mesures, les écarts des déciles diminuent lorsque la fréquence augmente alors que, dans d'autres mesures, ils augmentent.

Des études de l'évanouissement à long terme ont été entreprises en URSS [Khmelnitsky, 1970a et 1975; Bogdanov et Segal, 1967; Blagovechtchensky, 1981] pour des liaisons radioélectriques fonctionnant à des fréquences pas trop rapprochées de la MUF (jusqu'à 0,85) aux latitudes moyennes et septentrionales. Aux latitudes moyennes, les écarts des déciles sont de 4 à 5 dB sur les trajets de moins de 3000 km et de 6,5 à 10 dB sur les trajets de plus de 3000 km. Aux latitudes septentrionales, les écarts des déciles sont respectivement de 7,5 à 12 dB et 12,5 à 15 dB.

Une étude a été entreprise récemment en République fédérale d'Allemagne, basée sur environ 40 000 valeurs des médianes horaires mensuelles (et leurs écarts de déciles) du champ de signaux en ondes décamétriques. Ces mesures ont porté à la fois sur des trajets à un seul bond et à plusieurs bonds sous toutes les latitudes [CCIR, 1982-86b]. L'évanouissement à long terme ne semble pas varier beaucoup avec la longueur du trajet, l'heure de la journée, la saison ou le nombre de taches solaires. Il varie toutefois sensiblement en fonction du rapport de la fréquence du signal à la médiane mensuelle de la MUF de référence.

On trouve, dans le Supplément au Rapport 252, des valeurs représentatives des écarts du décile inférieur et du décile supérieur du champ par rapport à sa médiane mensuelle, ces écarts étant dus à la variabilité d'un jour à l'autre. Les valeurs indiquées ont été calculées à partir de résultats de mesures; elles sont données séparément pour les trajets de moins de 2500 km et pour ceux de plus de 2500 km, en fonction de l'heure locale au milieu du trajet, de la saison et de la latitude géomagnétique du milieu du trajet. On trouvera dans le Rapport 432 des renseignements sur les variations à long terme dans les bandes 5 (ondes kilométriques) et 6 (ondes hectométriques).

Le Rapport 322 donne des valeurs des écarts des déciles correspondants de la puissance des bruits atmosphériques, en fonction de la fréquence, de la saison et de l'heure locale.

On ne possède pour le moment aucun renseignement sur la variabilité d'un jour à l'autre des bruits artificiels, mais on peut s'attendre à constater une certaine influence de l'activité générale, par exemple, une diminution des bruits artificiels les jours non ouvrables.

6. Marges contre les évanouissements pour la planification d'un service

La mise en œuvre d'une méthode de planification d'un service fondée sur une analyse de compatibilité requiert deux choses:

- une comparaison du champ des signaux utiles avec le bruit, afin de voir si l'on obtient la qualité de réception désirée en l'absence de brouillage,
- une comparaison avec les signaux brouilleurs transmis dans la même voie et dans la voie adjacente pour voir si les brouillages sont préjudiciables.

On doit ajouter aux estimations des médianes mensuelles des marges appropriées contre les évanouissements. Il convient d'examiner ces marges séparément selon que le bruit de fond est un bruit atmosphérique, un bruit artificiel ou un signal brouilleur mais, dans tous les cas, elles dépendent:

- de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre du signal utile,
- de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre du bruit de fond,
- de la corrélation entre le champ du signal utile et celui de la perturbation,
- de la fraction du temps pendant laquelle la qualité de réception désirée doit être atteinte.

La médiane mensuelle du rapport «signal utile/bruit de fond» nécessaire pour une réception satisfaisante étant donnée, il convient en premier lieu d'évaluer le renforcement ou marge contre les évanouissements $F_{b,90}$ nécessaire pour atteindre la qualité de réception désirée pendant 90% du temps en présence de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre à la fois du signal et du bruit de fond. Les marges contre les évanouissements pour d'autres pourcentages du temps peuvent alors être exprimées en fonction de $F_{b,90}$.

Dans l'hypothèse où il n'y a pas corrélation entre l'évanouissement au cours d'une heure ni entre l'évanouissement d'un jour à l'autre des signaux utiles et de la perturbation, on peut donner pour $F_{b,90}$ l'expression approchée suivante [CCIR, 1982-86c]:

$$F_{b,90} = \sqrt{S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + B_h^2 + B_d^2} \quad \text{dB} \qquad (10)$$

dans laquelle:

S_{wh} : écart du décile inférieur du signal utile par rapport à la médiane horaire du champ, cet écart provenant des variations au cours d'une heure (dB)

S_{dd} : écart du décile inférieur du signal utile par rapport à la médiane mensuelle du champ, cet écart provenant des variations d'un jour à l'autre (dB)

B_h : écart du décile supérieur du bruit de fond par rapport à la médiane horaire du champ, cet écart provenant des variations au cours d'une heure (dB)

B_d : écart du décile supérieur du bruit de fond par rapport à la médiane mensuelle du champ, cet écart provenant des variations d'un jour à l'autre (dB).

Pour l'évanouissement du signal à court terme, la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (CAMR HFBC(1)), Genève, 1984, a adopté un écart de 5 dB pour le décile supérieur et un écart de −8 dB pour le décile inférieur. En ce qui concerne l'évanouissement du signal à long terme, les écarts du décile sont fonction du rapport de la fréquence de fonctionnement à la MUF de référence, indiqué au Tableau III.

TABLEAU III – *Ecarts à 90% et 10% par rapport à la valeur médiane mensuelle prévue du champ du signal (dB), provenant de la variabilité d'un jour à l'autre*

Latitude géomagnétique corrigée (1)	< 60°		⩾ 60°	
Fréquence d'émission/MUF de référence prévue	90%	10%	90%	10%
⩽ 0,8	−8	6	−11	9
1,0	−12	8	−16	11
1,2	−13	12	−17	12
1,4	−10	13	−13	13
1,6	−8	12	−11	12
1,8	−8	9	−11	9
2,0	−8	9	−11	9
3,0	−7	8	−9	8
4,0	−6	7	−8	7
⩾ 5,0	−5	7	−7	7

(1) Si un point quelconque de cette partie du grand cercle qui passe par l'émetteur et par le récepteur et qui se trouve entre les points directeurs situés à 1000 km de chaque extrémité du trajet atteint une latitude géomagnétique corrigée de 60° ou plus, il faut utiliser les valeurs correspondant aux latitudes ⩾ 60°.

En principe, les marges contre les évanouissements devraient aussi tenir compte de la fréquence des évanouissements, laquelle peut affecter la qualité de la réception, mais on ne dispose pas encore de données à cet effet. La marge $F_{b,x}$ contre les évanouissements pour x% du temps s'exprime facilement en fonction de $F_{b,90}$ par la formule:

$$F_{b,x} = c \cdot F_{b,90} \qquad \text{dB} \qquad (11)$$

x étant compris entre 50 et 90%, les valeurs de c pour une distribution log-normale du rapport signal/perturbation, pour une distribution de Rayleigh et pour une distribution composite intermédiaire sont tout à fait semblables et très voisines de ce qu'indique le Tableau IV.

TABLEAU IV – *Valeurs du coefficient c*

x (%)	c
50	0
60	0,18
70	0,36
80	0,63
90	1

7. Corrélation des signaux dans l'espace, dans le temps, en fréquence et en polarisation

L'étude de la corrélation entre deux signaux reçus, en fonction de leur séparation dans l'espace, dans le temps, en fréquence ou en polarisation, peut fournir d'utiles renseignements pour l'établissement d'un système de télécommunication en présence d'évanouissements.

Outre le procédé qui consiste à augmenter la puissance de l'émetteur, on a recours également [Stein, 1966] à des méthodes de modulation et de réception qui sont moins sensibles aux évanouissements. Le procédé le plus répandu est celui de la réception en diversité qui consiste à associer plusieurs récepteurs. Selon le mécanisme de propagation, on peut avoir recours à l'un des procédés suivants pour obtenir des signaux dont les périodes d'évanouissement sont indépendantes les unes des autres:

- diversité d'espace (antennes espacées);
- diversité en fréquence;
- diversité selon l'angle d'arrivée des ondes;
- diversité de polarisation;
- diversité dans le temps (répétition du signal);
- diversité par trajets multiples (Rake).

Les deux derniers de ces procédés ont surtout été utilisés dans la transmission de signaux numériques.

Ce n'est pas ici le lieu d'étudier dans le détail les caractéristiques des voies et des méthodes de réception en diversité, mais il convient de signaler que la plupart des études sur ce mode de réception se rapportent à des évanouissements lents, non sélectifs. Or, depuis quelques années, les évanouissements rapides non sélectifs retiennent de plus en plus l'attention. Balser et Smith [1962] ont obtenu des données très utiles sur la propagation ionosphérique par trajets multiples, au moyen de sondeurs à incidence oblique dont les impulsions ont des durées de l'ordre de 10 à 100 μs.

D'après les données typiques recueillies [Stein, 1966], on peut conclure que si l'on tente de transmettre en série des séquences de signaux numériques à de grandes distances, par l'intermédiaire de l'ionosphère, à des vitesses supérieures à 100-200 impulsions par seconde, et sans prendre de mesures spécifiques contre la propagation par trajets multiples, on risque d'obtenir d'importantes interférences entre symboles.

Les opérateurs s'efforcent de pallier les inconvénients dus à la propagation par trajets multiples en utilisant des fréquences voisines de la MUF. Une autre méthode consiste à mettre en œuvre des systèmes d'antennes très directives à orientation automatique, telles que les MUSA [Polkinghorn, 1940], qui favorisent certains trajets à bonds multiples par rapport à d'autres trajets.

Pour caractériser le degré d'approximation des évanouissements lents non sélectifs, on dispose d'un paramètre utile qui est le *facteur d'étalement* [Stein, 1966]. Si T est la durée de l'impulsion d'information, les évanouissements sont essentiellement non sélectifs si l'étalement T_M dans une transmission par trajets multiples est tel que:

$$T_M \ll T \tag{12}$$

De même, si B_D est l'étalement dû à l'effet Doppler (largeur du spectre de puissance reçu avec porteuse non modulée), les évanouissements seront essentiellement lents si l'on a:

$$T \ll 1/B_D \tag{13}$$

Pour obtenir une approximation des évanouissements lents non sélectifs, il faut que T satisfasse à la fois aux formules (12) et (13) et il faut que le facteur d'étalement L défini par l'expression:

$$L = B_D T_M \tag{14}$$

soit tel que

$$L \ll 1 \tag{15}$$

7.1 *Réception en diversité*

Pour en revenir à la réception en diversité, Stein [1966] donne la liste suivante des méthodes linéaires usuelles (applicables à la fois à la réception numérique et à la réception sans distorsion de signaux analogiques):

- combinaison de signaux sélectionnés,
- combinaison des signaux ayant des rapports d'intensité maximaux,
- combinaison de signaux sur la base de l'égalité du gain.

Stein décrit également des méthodes plus complexes: diversité basée sur le niveau de décision (transmission numérique), où l'on renonce à la fidélité des signaux considérée comme superflue et où le seul but recherché consiste à réduire au minimum le taux d'erreur.

Il convient de signaler une série limitée d'essais de réception en diversité d'espace effectués au Royaume-Uni avec des transmissions téléphoniques à bande latérale unique. Ces essais ont montré que l'avantage acquis était modeste pour ce type de transmission: la largeur de bande de corrélation était insuffisante et l'amplitude «instantanée» de la porteuse réduite ne constituait pas un bon indice pour la transmission de la bande de fréquences vocales. En revanche, la réception en diversité présente de grands avantages dans la téléphonie à modulation d'amplitude avec double bande latérale (et transmission de la porteuse) et dans la transmission de signaux télégraphiques typiques.

Dans la propagation ionosphérique, la limitation la plus importante est normalement l'étalement par trajets multiples, T_M. Une largeur de bande Δf peut se définir en fonction de l'inverse de T_M:

$$\Delta f = 1/T_M$$

qui est analogue à la «largeur de bande de cohérence», à la «largeur de bande d'évanouissements uniformes» ou à la «largeur de bande d'évanouissements sélectifs» [Stein et Jones, 1967]. L'étalement par trajets multiples dans la propagation ionosphérique résulte:

- des différences entre les temps de propagation suivant le mode ordinaire et extraordinaire,
- des différences entre les temps de propagation entre le trajet supérieur et le trajet inférieur,
- des différences entre les temps de propagation suivant des modes multiples,
- des différences entre les temps de propagation dues à des irrégularités (F-diffus, etc.),
- de l'élargissement des impulsions dans la réflexion normale dû à la dispersion.

Pickering [1975] a calculé l'étalement par trajets multiples et par effet Doppler pour le canal ionosphérique à ondes décamétriques. Ces calculs ont abouti à l'établissement du «facteur de réduction par effet Doppler», comparable au «facteur de réduction par trajets multiples» de Bailey [1959] et de Salaman [1962], et qui peut servir à déterminer la fréquence de travail appropriée sur une liaison donnée en ondes décamétriques.

Les premières recherches sur la diversité d'espace, de polarisation et de fréquence ont été faites avant 1940. Cependant, les méthodes mathématiques nécessaires aux recherches sur les aspects théoriques et empiriques de la réception en diversité ont été largement développées depuis 1947 [Briggs et autres, 1950; Booker et autres, 1950; Glazer et Farber, 1953; Ratcliffe, 1956].

En se fondant sur un modèle simple, sinon entièrement satisfaisant, de la diffusion sur une ionosphère non homogène et variable avec le temps, on peut établir une fonction de corrélation dans l'espace $\rho(d)$, réduite à l'unité pour $d = 0$, pour montrer la relation existant entre les signaux d'onde entretenue pour deux antennes séparées par une distance d [Bramley, 1951; Grisdale et autres, 1957; Brennan, 1960; Khmelnitsky, 1960]:

$$\rho(d) = \exp\left[-d^2/2\,x^2\right] \qquad (16)$$

Le paramètre x est une fonction de l'échelle de structure des non-homogénéités ionosphériques, de la longueur du trajet et de la fréquence. A la distance $d = x$, la corrélation est de 0,61 et à la distance $d = x\sqrt{2}$, elle est de 0,37. L'expérience et la théorie montrent que tous les avantages de la diversité sont pratiquement obtenus pour la plus courte de ces distances. Par exemple, pour deux signaux subissant des évanouissements indépendants ($\rho = 0$), l'amélioration due à la réception en diversité est de 14 à 15 dB au niveau de fiabilité de 99,9%. Pour $\rho = 0{,}61$, l'amélioration due à la diversité est de 13 dB. Il semble donc justifié de désigner la distance $d = x\sqrt{2}$ par l'expression «distance de séparation de diversité» ou «distance de corrélation».

On a fait au Royaume-Uni des essais dans la gamme 6-18 MHz, sur des distances de 2000 à 17 000 km et les valeurs obtenues pour x étaient comprises entre 150 et 400 m, correspondant à des distances de corrélation comprises entre 210 et 560 m (soit 10 à 25 longueurs d'onde). Ces conclusions ont été confirmées par des enregistrements de WWV sur 15 MHz faits en République fédérale d'Allemagne. De plus, on a montré que les distances de séparation requises, lorsque la réflexion spéculaire sur l'ionosphère est prédominante, sont beaucoup plus grandes qu'en présence d'une composante erratique importante.

Dans une autre série de mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique, sur des fréquences inférieures à celles des ondes décamétriques, la distance de corrélation moyenne à 540 kHz était de $29{,}4\,\lambda \pm 17{,}1\,\lambda$ [Brennan et Phillips, 1957] alors qu'à 85 kHz [Bowhill, 1957], on observait deux périodes distinctes d'évanouissement, l'une de 7 min et l'autre de 1,5 min. La distance de corrélation a été évaluée à 5 km dans le premier cas et à 1 km dans le second.

La diversité de polarisation dans la gamme de 6 à 18 MHz a été étudiée aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni. Les antennes étaient situées au même emplacement mais disposées de manière à recevoir des ondes perpendiculaires l'une à l'autre. Le résultat fut que l'action de la diversité est à peu près la même qu'avec une séparation équivalente de 240 à 480 m [Grisdale et autres, 1957] en diversité d'espace.

Des expériences effectuées en Australie et en Nouvelle-Guinée, avec des émissions de radiodiffusion à incidence verticale dans les bandes d'ondes hectométriques et décamétriques, ont montré qu'un système fonctionnant en diversité de polarisation permettrait de réduire sensiblement les évanouissements et la distorsion.

7.2 *Corrélation en fréquence*

Pour transmettre une information, il faut obligatoirement disposer d'une bande de fréquences. On démontre que, pour les besoins de l'analyse, il suffit de savoir ce qui se passe avec deux fréquences différentes, transmises simultanément [Stein, 1966]. En pratique, si l'espacement entre les deux fréquences est suffisant, la corrélation des fluctuations des évanouissements sur les deux fréquences tend vers zéro, le manque de corrélation entre ces évanouissements est désigné par le terme *évanouissements sélectifs.*

Une étude ancienne sur les évanouissements sélectifs observés avec des signaux à plusieurs tonalités sur un trajet transocéanique a fait l'objet d'un mémoire devenu classique de Potter [1930]. D'autres recherches ont été effectuées au cours des années 1950 [Briggs, 1951; Price et Green, 1958].

La constante de corrélation en fréquence (rayon de corrélation) de l'évanouissement sélectif est, en général, inversement proportionnelle à la valeur du retard maximal entre les rayons des trajets multiples. Sur des trajets de latitude moyenne atteignant 3000 km, la constante de corrélation en fréquence est comprise entre 250 et 7500 Hz, en fonction du rapport de la fréquence de travail à la MUF de référence, et atteint un maximum lorsque ce rapport est compris entre 0,6 et 0,8 [Malygin et Sergueev, 1984].

7.3 *Caractéristiques du signal se rapportant au codage*

Dans les applications aux communications numériques modernes, on emploie invariablement des schémas de diversité à propos du codage des signaux. Le format de base du codage est le codage avec correction d'erreurs sans voie de retour (ou codage CED) [Wu, 1971; Diffie et Hellman, 1976; Fang, 1975]. Pour ce codage, on fait plusieurs hypothèses communes au sujet des caractéristiques du canal ionosphérique. Le signal reçu est généralement modélisé comme ayant une composante additive de bruit gaussien blanc, un faible évanouissement (< 4 dB) instantané et un évanouissement profond (> 4 dB) occasionnel.

Plusieurs paramètres sont d'une très grande importance: le nombre n_1 de bits pendant la durée d'un évanouissement profond et le nombre n_2 de bits pendant celle d'un évanouissement instantané, n_1 et n_2 étant tous deux en relation avec le débit binaire sur le canal et avec la dynamique de l'ionosphère. Les méthodes diversité dans le temps/codage CED valables pour ce type de canal appartiennent à deux grandes catégories. Dans la première, on procède par entrelacement pour disperser les bits transmis au cours d'un évanouissement profond de manière que chaque erreur binaire semble indépendante des autres. On applique alors un code CED capable de corriger la plupart de ces erreurs. Dans la seconde catégorie, on utilise un code CED capable de corriger la plupart des erreurs qui se produisent au cours d'une durée sans évanouissement profond, de manière à garantir que le canal donnera satisfaction pendant la période sans évanouissement. On trouvera plus de détails dans [Wu, 1971; Diffie et Hellman, 1976 et Fang, 1975].

8. Spécification des canaux pour signaux modulés

La théorie a fait l'objet de développements mathématiques rigoureux dans lesquels les canaux se trouvent caractérisés comme des filtres variables avec le temps [Zadeh et Desoer, 1963]. Une méthode empirique pour la spécification des canaux radioélectriques exige que l'ensemble des paramètres radioélectriques soit identifié de façon plus complète qu'il n'a été possible de la faire jusqu'à présent en raison des limitations imposées aux expériences de propagation. Certes, les principes théoriques de base ont été, en grande partie, dégagés par un certain nombre de chercheurs [Green, 1963; Bello, 1963, 1964], mais il reste beaucoup à faire.

D'autres auteurs ont également apporté leur contribution à cette étude [Turin, 1956; Brennan, 1959; Barrow, 1963; Staras, 1956; Pierce et Stein, 1960; Wozencraft, 1961; Baghdady, 1961; Bello et Nelin, 1963].

On a élaboré un certain nombre de modèles pour caractériser les canaux et le Rapport 549 traite en détails les simulateurs de la propagation ionosphérique en ondes décamétriques. Watterson et autres [1970] décrivent l'un de ces modèles et le justifient expérimentalement. Cet article, qui contient également une longue liste de références bibliographiques, est résumé ci-après à titre d'exemple des recherches faites sur ce sujet:

«Résumé. – On a mesuré et analysé les signaux d'une transmission expérimentale en ondes décamétriques à propagation ionosphérique pour vérifier le bien-fondé et les limitations de largeur de bande d'un modèle stationnaire proposé. Dans le modèle, le signal d'entrée (émis) est appliqué à une ligne à retard à caractéristiques idéales, et on le prélève en plusieurs points (prises) avec des retards réglables selon les composantes du signal. Chaque composante retardée est modulée en amplitude et en phase par une fonction de gain pour chaque point où l'on prélève la bande de base. Le signal de sortie (reçu) est constitué par la somme des signaux retardés et modulés (avec adjonction d'un bruit additif). La définition des spécifications statistiques des fonctions de gain aux prises de prélèvement est fondée sur trois hypothèses: 1) chaque fonction de gain obéit à la loi gaussienne complexe qui produit des évanouissements de Rayleigh, 2) les fonctions de gain sont indépendantes et 3) le spectre de chaque fonction de gain représente en général la somme de deux fonctions gaussiennes de la fréquence, une pour chaque composante magnéto-ionique. On a appliqué des tests statistiques aux résultats des

mesures (diurnes et nocturnes), confirmant la validité des trois hypothèses et, par voie de conséquence, celle du modèle. Pour les applications pratiques, on peut considérer que le modèle est utilisable sur une largeur de bande égale au quart environ de l'inverse des étalements effectifs (pondérés) dans le temps, pour les composantes du mode de propagation ionosphérique. Le modèle devrait pouvoir servir aussi bien dans les études théoriques des performances des systèmes de radiocommunication que dans la réalisation de simulateurs de canaux.»

On a appliqué une autre méthode, qui met en œuvre des modèles de trajets de propagation; cette méthode permet d'évaluer quantitativement avec plus de précision les possibilités de transmission de l'information [Konopleva et Khmelnitsky, 1970; 1972]. Il conviendrait de vérifier la précision de cette méthode d'évaluation, ainsi que la possibilité d'effectuer les calculs sur la base des caractéristiques de voies effectives, en ce qui concerne la variation des paramètres du signal utile [Khmelnitsky, 1970b] et du signal brouilleur [Khmelnitsky, 1969]. Cette vérification devrait se faire sur des circuits ayant des orientations et des longueurs variables.

En Espagne, des mesures effectuées sur la réponse impulsionnelle d'un canal en ondes décamétriques [CCIR, 1982-86d] ont mené à la conclusion que cette méthode est valable pour caractériser ces types de canaux et peut même être appliquée à l'étude de canaux dans d'autres bandes de fréquences.

9. Autres études souhaitables

Il serait souhaitable de poursuivre les études sur les sujets exposés dans les § 7 et 8 ci-dessus, notamment en ce qui concerne les trajets ionosphériques dans les différentes parties du monde.

Par exemple, parmi les causes physiques des évanouissements, les effets de focalisation et de défocalisation [Fok, 1950; Liakhova, 1965; Rawer, 1952; Kerblaï, 1963] devraient, semble-t-il, être étudiés de plus près. Ces phénomènes se manifestent avec une remarquable périodicité, ce qui porte à croire qu'ils sont susceptibles d'une description plus satisfaisante que celle fournie actuellement par des modèles statistiques aléatoires.

Pour améliorer les connaissances sur la profondeur et la rapidité des évanouissements, il faudrait élaborer des théories nouvelles pour résoudre le problème pratique important que posent les évanouissements de plus longue durée ainsi que les augmentations du champ liées aux irrégularités de l'ionosphère, afin de compléter la théorie des grandeurs statistiques aléatoires. Les méthodes d'autocorrélation seraient de nature à faciliter l'étude des phénomènes qui peuvent être considérés comme intermédiaires entre les processus réguliers et les processus aléatoires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAGHDADY, E. J. [1961] *Lectures on Communication System Theory.* Chapitres 5 et 6, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

BAILEY, D. K. [1959] The effect of multipath distortion on the choice of operating frequencies for high-frequency communication circuits. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-7, 397-405.

BALSER, M. et SMITH, W. B. [1962] Some statistical properties of pulsed oblique HF ionospheric transmissions. *NBS J. Res.*, Vol. 66D, **6**, 721-730.

BARROW, B. B. [1963] Diversity combination of fading signals of unequal mean strengths. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 73.

BELLO, P. A. [1963] Characterization of randomly time-variant linear channels. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 360-393.

BELLO, P. A. [1964] Measurement of the complex time-frequency channel correlation function. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 1161-1165.

BELLO, P. A. et NELIN, B. D. [1963] The effect of frequency selective fading on the binary error probabilities of incoherent and differentially coherent matched filter receivers. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 170.

BENNINGTON, T. W. [1960] Equatorial ionospheric effects. *Wireless World*, Vol. 66, **10**, 501-506.

BLAGOVECHTCHENSKY, D. V. [1981] Rasprostranenie dekametrovykh radiovoln v vysokikh chirotakh (Propagation des ondes décamétriques aux latitudes élevées), 180. Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

BOGDANOV, S. E. et SEGAL, G. F. [1967] Statistitcheskie svoistva srednikh znachenii napryajonnosti poly a korotkovolnovykh signalov (Caractéristiques statistiques des valeurs moyennes du champ dans le cas de signaux en ondes décamétriques). Recueil d'articles du NIIR, **3**, (47).

BOOKER, H. G., RATCLIFFE, J. A. et SHINN, D. H. [1950] Diffraction from an irregular screen with applications to ionospheric problems. *Phil. Trans. Roy. Soc.* (Londres), Série A, **242**, 579.

BOWHILL, S. A. [1957] Ionospheric irregularities causing random fading of very low frequencies. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **11**, 91-101.

BRADLEY, P. A. et VERNON, A. [1982] Decile deviations of HF daily signal strengths. GTI 6/1 Doc. 218.

BRAMLEY, E. N. [1951] Diversity effects in spaced-aerial reception of ionospheric waves. *Proc. IEE*, **98**, Part III, 19-25.

BRENNAN, D. G. [1959] Linear diversity combining techniques. *Proc. IRE*, Vol. 47, **6**, 1075-1102.

BRENNAN, D. G. [1960] The extrapolation and interpolation of spatial correlation functions. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, 296-305. Ed. W. C. Hoffman, Pergamon Press, New York/Oxford.

BRENNAN, D. G. [1961] Probability theory in communication system engineering (Chapter 2); Analysis of long-term variability (Chapter 20). *Lectures on Communication System Theory.* Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

BRENNAN, D. G. et PHILLIPS, M. L. [1957] Phase and amplitude variability in medium frequency ionospheric transmission. Lincoln Lab., MIT, TR-93.

BRIGGS, B. H. [1951] An investigation of certain properties of the ionosphere by means of a rapid frequency change experiment. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 64B, Part 3, **375B**, 255-274.

BRIGGS, B. H., PHILLIPS, G. J. et SHINN, D. H. [1950] The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 63B, Part 2, **362B**, 106-121.

DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph N° 80.

DAVIES, K. et BARGHAUSEN, A. F. [1964] The effect of spread F on the propagation of radio waves near the equator. AGARD Ninth Meeting of the Ionospheric Research Committee, Copenhague, Danemark.

DIFFIE, W. et HELLMAN, M. E. [1976] New directions in cryptography. *IEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 22, 644-654.

FANG, R. J. [1975] DIVEC, a combined diversity and error control scheme. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 5, 105-133.

FOK, V. A. [1950] Obobchtchenie otrajatelnykh formul na slutchaï otrajeniia proïzvolnoï volny ot poverkhonsti proïzvolnoï formy (Généralisation des formules de réflexion pour le cas de la réflexion d'une onde arbitraire sur une surface de forme arbitraire). *Journ. Eksp. Teoret. Fisiki*, **20**, 961.

GLAZER, J. et FARBER, L. [1953] Evaluation of polarization diversity performance. *Proc. IRE*, Vol. 41, 1774-1778.

GREEN, P. E., Jr. [1963] Time-varying channels with delay spread. *Monograph on Radio Waves and Circuits.* Ed. S. Silver, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.

GRISDALE, G. L., MORRIS, J. G. et PALMER, D. S. [1957] Fading of long-distance radio signals and a comparison of space- and polarization-diversity reception in the 6-18 Mc/s range. *Proc. IEE*, Vol. 104B, **13**, 39-51.

GROSSKOPF, J. [1953] Statistical studies of short-wave transmission paths. *NTZ*, **6**, 373-378.

GROSSKOPF, J. [1955a] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, I. Teil (Mesures du champ dans la bande des ondes décamétriques, Partie I). *NTZ*, **8**, 114.

GROSSKOPF, J. [1955b] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, II. Teil (Mesures du champ dans la bande des ondes décamétriques, Partie II). *NTZ*, **8**, 146.

HUMBY, A. M. [1959] Equatorial sunset effect. *Wireless World*, Vol. 65, **7/8**, 343-345.

KERBLAÏ, T. S. [1963] Vliianie gorizontalnykh gradientov elektronnoï kontsentratsii v ionosphere na velitchinou MPTCH (Influence des gradients horizontaux de la concentration d'électrons dans l'ionosphère sur la valeur de la MUF). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 772.

KERBLAÏ, T. S., NOSOVA, G. N., ALLABERDIEV, D. et POROSNAYA, A. P. [1974] O kharactere zamiranii signala pri razlichnikh sposobakh rasprostranenia radiovoln (Caractéristiques des évanouissements des signaux selon le mode de propagation). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 14, **6**, 1024.

KERBLAÏ, T. S., NOSOVA, G. N., MINULLIN, R. G. et KURGANOV, R. A. [1977] Periodi fluktuatsii signalov obuslovlennikh ionosfernim rasseianiein i otrageniem ot sloia Es na chastotakh 27.8 i 40.3 MHz (Périodes de fluctuation du signal causées par la diffusion ionosphérique et par les réflexions sur la couche Es aux fréquences 27,8 et 40,3 MHz). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 17, **2**, 231.

KHMELNITSKY, E. A. [1960] *Raznessennyi priem i opredelenie ego effektivnosti* (La réception en diversité et la détermination de son efficacité). Sviazizdat, Moscou, URSS.

KHMELNITSKY, E. A. [1969] Veroyatnost sboya na kv liniyakh svyazi pri pomekhakh ot sosednikh po chastote stantsii (Probabilité d'erreur sur des circuits radioélectriques à ondes courtes du fait du brouillage causé par des stations fonctionnant sur des fréquences voisines). *Elektrosviaz*, **4**, 22-30.

KHMELNITSKY, E. A. [1970a] Sravnenie eksperimentalnykh i rastchotnykh znatchenii urovnya signala v KV diapazone (Comparaison entre valeurs expérimentales et valeurs calculées des niveaux du signal dans les gammes d'ondes décamétriques). *Elektrosviaz*, **6**, 45-51.

KHMELNITSKY, E. A. [1970b] Otsenka katchestva kv kanala svyazi dlya peredatchi diskretnykh signalov (Evaluation de la qualité d'un circuit radioélectrique à ondes courtes transmettant des signaux discrets). *Elektrosviaz*, **10**, 18-32.

KHMELNITSKY, E. A. [1975] Otsenka realnoi pomekhozachtchichtchennosti priïma signalov v KV diapazone (Evaluation de la protection réelle contre les brouillages de la réception dans les gammes d'ondes décamétriques). Sviaz, Moscou, URSS.

KONOPLEVA, E. N. [1964] La fiabilité des communications et le rapport signal/bruit nécessaire dans les voies radioélectriques en ondes décamétriques (en russe) *Elektrosviaz*, **5**, 3-8.

KONOPLEVA, E. N. et KHMELNITSKY, E. A. [1970] Vozmojnye sostoyaniya kv kanala svyazi po usloviyam rasprostraneniya radiovoln (Etats possibles d'un canal radioélectrique, selon les conditions de propagation). *Elektrosviaz*, **12**, 19-24.

KONOPLEVA, E. N. et KHMELNITSKY, E. A. [1972] Modeli rasprostraneniya radiovoln na kv liniyakh svyazi neoptimalnoi protyajennosti (Modèles de propagation sur les circuits à ondes courtes de longueur non optimale). *Elektrosviaz*, **1**, 33-38.

KOSIKOV, K. M. [1957] Zamiranie signala (Evanouissement des signaux). Recueil d'articles du NIIR, **2**(6), 42-45.

KOSTER, J. R. [1963] Some measurements on the sunset fading effect. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 2571-2578.

LIAKHOVA, L. N. [1965] Otsenka effekta fokoussirovky pri rasprostranenii radiovoln po rikochetirouemoï traiektorii (Evaluation de l'effet de focalisation lors de la propagation des ondes radioélectriques sur une trajectoire à ricochets). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 5, 351.

MALYGIN, V. B. et SERGUEEV, O. I. [1982] Rezoultaty eksperimentalnoi otsenki korrelyatsionnoi i spektralnoi founktsii ogibayouchtchei KV-signala (Résultats d'une évaluation expérimentale de la fonction de corrélation et de la fonction spectrale de l'enveloppe d'un signal en ondes décamétriques). *NIIR Proc.*, **2**.

MALYGIN, V. B. et SERGUEEV, O. I. [1984] Otsenka intervalov chastotnoy korrelyatsii ogibayouchtchei KV-signala pri razlitchnykh ousloviyakh rasprostraneniya (Evaluation des intervalles de corrélation en fréquence de l'enveloppe d'un signal en ondes décamétriques pour diverses conditions de propagation). *Radiotekhnika*, **10**.

MALYGIN, V. B., SERGUEEV, O. I. et CHERNOV, Y. A. [1982] Otsenka mnogoloutchevosti KV-signala po rezoultatam impoulsnogo naklonnogo zondirovaniya (Evaluation des caractéristiques des signaux de trajets multiples en ondes décamétriques à partir de résultats de sondages obliques impulsifs). *Radiotekhnika*, Vol. 37, **5**.

McNICOL, R. W. E. [1949] The fading of radio waves of medium and high frequencies. *Proc. IEE*, Part III, **96**, 517-524.

NAKAGAMI, M. [1943] Statistical character of short-wave fading. *J. Inst. Elec. Comm. Engrs. Japan*, **27**, 145.

NAKAGAMI, M. [1960] The m-distribution: a general formula of intensity distribution of rapid fading. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation.* Ed. W. C. Hoffman, 3-36, Pergamon Press, New York/Oxford.

NORTON, K. A., VOGLER, L. E., MANSFIELD, W. V. et SHORT, P. J. [1955] The probability distribution of the amplitude of a constant vector plus a Rayleigh distributed vector. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1354-1361.

OSBORNE, B. W. [1952] Note on ionospheric conditions which may affect tropical broadcasting after sunset. *J. Brit. Inst. Radio Engrs.*, **12**, 110.

PICKERING, L. W. [1975] The calculation of ionospheric Doppler Spread on HF communication channels. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 526-537.

PICQUENARD, A. [1974] *Radio Wave Propagation.* Halsted Press, John Wiley and Sons, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

PIERCE, J. N. et STEIN, S. [1960] Multiple diversity with non-independent fading. *Proc. IRE*, Vol. 48, **1**, 89-104.

POLKINGHORN, F. A. [1940] A single-sideband Musa receiving system for commercial operation on transatlantic radiotelephone circuits. *Proc. IRE*, Vol. 28, **4**, 157-170.

POTTER, R. K. [1930] Transmission characteristics of a short-wave telephone circuit. *Proc. IRE*, Vol. 18, 581-648.

PRICE, R. [1957] The autocorrelogram of a complete carrier wave received over the ionosphere at oblique incidence. *Proc. IRE*, Vol. 45, 879-880.

PRICE, R. et GREEN, P. E. [1958] A communication technique for multipath channels. *Proc. IRE*, Vol. 46, 555-570.

RATCLIFFE, J. A. [1956] Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere. *Reports on Progress in Physics*, **19**, 188, Proc. Physical Society, Londres, Royaume-Uni.

RAWER, K. [1952] Calculation of sky-wave field strength. *Wireless Engineer*, Vol. 29, 287-301.

RICE, S. O. [1944, 1945] Mathematical analysis of random noise. *BSTJ*, Vol. XXIII, 282 et Vol. XXIV, 46.

RICE, S. O. [1948] Statistical properties of a sine wave plus random noise. *BSTJ*, Vol. XXVII, 109-157.

RICE, S. O. [1958] Distribution of the duration of fades in radio transmission: Gaussian noise model. *BSTJ*, Vol. XXXVII, **3**, 581-635.

RÖTTGER, J. [1973] Langperiodisches Fading von Kurzwellensignalen (Les évanouissements d'une période prolongée des signaux en ondes décamétriques). *Kleinheubacher Berichte*, **16**, 167-178.

SAILORS, D. B., KUGEL, C. P. et HAYDON, G. W. [1977] Predicting the compatibility of high frequency sky-wave communication systems. *IEEE Trans., Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 332-343.

SALAMAN, R. K. [1962] A new ionospheric multipath reduction factor (MRF). *IRE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-10, 220-221.

SERGUEEV, O. I. [1974] Rezoultaty eksperimentalnoi otsenki kharakteristik vybrosov KV-signala (Résultats d'une évaluation expérimentale des caractéristiques des évanouissements brusques d'un signal en ondes décamétriques). *NIIR Proc.*, **2**.

SERGUEEV, O. I. [1975] Rezoultaty izmereniya skorosti interferentsionnykh zamiranii KV-signala pri razlitchnykh ousloviyakh rasprostraneniya (Mesures de la rapidité d'évanouissement des signaux brouilleurs en ondes décamétriques pour différentes conditions de propagation). *NIIR Proc.*, **1**.

SERGUEEV, O. I., DOTOLEV, V. G., JILTSOV, A. U., PELEVIN, Y. V. et TCHERNOV, Y. A. [1985] K voprosou ob eksperimentalnoi otsenke srednego ourovnya ogibayouchtchei KV-signala (De l'évaluation expérimentale du niveau moyen de l'enveloppe d'un signal en ondes décamétriques). *NIIR Proc.*, **4**.

SPAULDING, A. D. [juin 1982] Fading signals in the MF band. National Telecommunications and Information Administration Report 82-102. NTIS Accession No. PB 82-262916. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

STARAS, H. [1956] Diversity reception with correlated signals. *J. Appl. Phys.*, (Lett.), Vol. 27, **1**, 93-94.

STEIN, S. [1966] PART III of *Communication Systems and Techniques*, par Schwartz, Bennett et Stein, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

STEIN, S. et JONES, J. J. [1967] *Modern Communication Principles.* McGraw-Hill, New York et Londres.

TÄUMER, F. et SULANKE, H. [1967-68] Die Eigenschaften von Häufigkeitsverteilungen der Raumwellenfeldstärke im Frequenzbereich von 150-1600 kHz (Les propriétés des distributions des champs de l'onde ionosphérique dans les bandes 5 et 6). *Techn. Mitt. RFZ*, Vol. 11, **4**, 192-195 et Vol. 12, **1**, 32-39.

TURIN, G. L. [1956] Communication through noisy, random-multipath channels. *IRE Nat. Conv. Record*, Partie 4, 154.

WATTERSON, C. C., JUROSHEK, J. R. et BENSEMA, W. D. [1970] Experimental confirmation of an HF channel model. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. 18, 792-803.

WOZENCRAFT, J. M. [1961] Sequential reception of time-variant transmissions. Ch. 12. *Lectures on Communication Theory.* Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WU, W. W. [1971] Applications of error-coding techniques to satellite communications. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 1, 183-219.

YEH, K. C. et VILLARD, O. G. [1958] A new type of fading observable on high-frequency radio transmission propagated over paths crossing the magnetic equator. *Proc. IRE*, Vol. 46, 1968-1970.

ZADEH, L. A. et DESOER, C. A. [1963] *Linear system theory.* McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1978-82]: 6/63 (URSS).

[1982-86]: **a.** 6/187 (URSS); **b.** 6/54 (Allemagne (République fédérale d')); **c.** GTI 6/12 Doc. D14 (GTI 10/5 Doc. 58); **d.** 6/212 (Espagne).

RAPPORT 891-1

CARACTÉRISTIQUES D'ANTENNE IMPORTANTES POUR L'ANALYSE ET LA PRÉVISION DES TRAJETS DE PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 28G/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Pour analyser la qualité observée d'un circuit de transmission de l'onde ionosphérique, ou prévoir la qualité d'un circuit projeté, il importe de connaître le gain et la directivité des antennes aux deux extrémités, à la fois pour la polarisation souhaitée et pour la polarisation croisée. Dans les bandes décamétriques et aux fréquences inférieures, les antennes sont généralement proches, en termes de longueur d'onde, du sol ou d'un support mobile. Il faut par ailleurs tenir compte des propriétés électriques et de la forme des objets environnants.

Lorsqu'on analyse l'effet des antennes sur la qualité d'un circuit, il ne faut pas oublier que les ondes ionosphériques ne présentent pas nécessairement les caratéristiques suivantes:

- suivre un arc de grand cercle entre l'émetteur et le récepteur,
- avoir le même angle de site aux deux extrémités,
- garder la polarisation de l'onde émise,
- avoir un front d'onde plan à l'endroit du récepteur.

2. Caractéristiques des antennes

2.1 *Directivité*

On peut calculer le diagramme de directivité d'une antenne d'émission dans l'espace libre d'après la distribution du courant dans l'antenne. Lorsque l'antenne est placée à proximité du sol, le diagramme de directivité est modifié dans le plan vertical et dans le plan horizontal, parce que le rayonnement direct de l'antenne se combine avec le rayonnement réfléchi au sol. On peut obtenir le diagramme de directivité d'un ensemble d'éléments d'antenne en combinant le diagramme de chaque élément avec son image optique par rapport au sol, en tenant compte de l'espacement géométrique entre les centres des éléments et de la phase relative des courants dans les éléments.

Lorsque le sol est plat et parfaitement conducteur, le coefficient de réflexion des ondes à polarisation horizontale est d'environ -1 pour tous les angles d'incidence. Un élément de courant horizontal a donc une image réfléchie dans laquelle le courant circule dans le sens opposé et le renforcement de l'effet de sol se produit à des angles de site pour lesquels la différence de trajet entre ondes directes et ondes réfléchies est égale à une demi-longueur d'onde. Le paramètre important pour la détermination du diagramme est la hauteur moyenne de la partie active de l'antenne. Si le sol n'est pas parfaitement conducteur, la valeur du coefficient de réflexion pour des angles importants d'incidence (angles d'émergence faibles) est moins élevée, mais la phase reste essentiellement de 180° de sorte que le diagramme à des angles de site faibles varie à peine. Le coefficient de réflexion réel peut entraîner une perte du gain, habituellement inférieure à 1 dB. Pour des angles d'incidence faibles (angles d'émergence ayant des valeurs élevées), le coefficient de réflexion diminue et l'affaiblissement peut être proportionnellement plus élevé et atteindre 3 dB; mais même dans ce cas, le gain de directivité reste de 3 dB plus élevé qu'il ne le serait en l'absence du renforcement par l'effet de sol. En conséquence pour des raisons pratiques, et en particulier pour des antennes dont l'angle d'émergence est faible, on peut ne pas tenir compte des effets d'un sol à conductivité imparfaite, si la polarisation est horizontale.

En ce qui concerne la polarisation verticale, les effets sont plus complexes. Dans le cas d'une conductivité élevée du sol, le coefficient de réflexion est égal à 1 environ. Un élément d'un courant vertical au-dessus du sol a une image réfléchie dans laquelle le courant circule dans le même sens, de sorte que le renforcement de l'effet de sol se produit à des angles d'émergence peu élevés. Cela peut se produire en pratique sur des sols dont la conductivité est très bonne ou sur la mer. Lorsque la conductivité est finie, la phase du coefficient de réflexion complexe varie de 180° à des angles d'incidence élevés. Sur la mer, cela se produit à des angles d'incidence supérieurs à 89° et la formation du faisceau à angle faible en est à peine affectée. Sur terre, la variation de phase se produit à des angles d'incidence d'environ 75° et la valeur du coefficient de réflexion devient faible dans la région où se produit la variation. Cet angle est appelé l'angle de Brewster. La qualité de fonctionnement de l'antenne est gravement affectée, particulièrement lorsque la réflexion minimale se produit à des angles comparables aux angles d'arrivée les plus probables des ondes ionosphériques décamétriques, dans le cas de liaisons à longue distance. A des angles de site faibles, la réflexion du sol a tendance à annuler l'onde directe, comme dans le cas de la polarisation horizontale [Radford, 1983].

Des mises à la terre de grandes dimensions sont parfois placées sous les antennes verticales, afin d'améliorer la conductivité du sol, mais, si des installations de ce type améliorent l'efficacité de rayonnement et le gain de directivité à des angles d'émergence élevés, les systèmes de conducteurs en étoile doivent s'étendre sur une distance de 10 à 50 fois la longueur d'onde devant l'antenne pour que l'on obtienne une amélioration pour des angles d'émergence faibles, inférieurs à 20° environ [Andersen, 1965].

Le sol n'est pas nécessairement plat ou horizontal. Il est possible de «modéliser» l'influence des irrégularités du sol sur la directivité de l'antenne, ou de faire une étude théorique de cette influence [Knight et autres, 1964; Kubanov et Sheredko, 1976; Kubanov, 1980; Ott, 1971; Ott et autres, 1979; Ott, 1984].

Les véhicules, notamment les aéronefs et les véhicules automobiles, peuvent avoir des dimensions comparables à la longueur d'onde et à la taille de l'antenne. Dans ce cas, la modélisation ou la mesure du rayonnement doit prendre en compte l'ensemble constitué par l'antenne et le véhicule [Hagn et van der Laan, 1970; Belrose, 1984].

Le diagramme de directivité d'une antenne est le même, qu'il s'agisse d'une antenne d'émission ou d'une antenne de réception.

2.2 *Gain*

Le gain d'une antenne est le produit de l'efficacité et de la directivité de cette antenne. L'efficacité de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance de l'émetteur. La puissance rayonnée par une antenne sur un sol véritable exige un calcul du courant arrivant à l'antenne, qui est déterminé par la résistance terminale qui, à son tour, dépend de facteurs provenant des pertes de conduction, des pertes dans le sol fini au-dessous de l'antenne et de la résistance de rayonnement contribuant à la puissance rayonnée par l'antenne. L'utilisation de résistances terminales dans certaines antennes réduit le gain de ces antennes et donc la puissance rayonnée à l'émission et la puissance disponible à la réception.

Un sol de conductivité imparfaite a non seulement une influence sur la directivité de l'antenne (comme on l'a indiqué ci-dessus) mais également sur l'impédance terminale. Ces deux caractéristiques peuvent être calculées en représentant les effets de sol par une antenne image identique à l'antenne réelle et symétrique de celle-ci par rapport à la surface du sol. L'impédance terminale d'une antenne sur un sol réel est égale à l'impédance terminale en espace libre (impédance propre) à laquelle s'ajoute l'impédance mutuelle de l'antenne image. Dans les méthodes mises au point par Barghausen et autres [1969], l'impédance mutuelle en espace libre est multipliée par les coefficients de réflexion complexes du sol sous incidence normale. Alors que cette méthode est probablement assez précise pour des calculs pratiques, il y a désormais des méthodes numériques perfectionnées permettant de déterminer la distribution actuelle réelle sur des antennes placées dans leur environnement; par exemple, la méthode des moments [Harrington, 1968; Poggio et Miller, 1973; Miller, 1984].

Une méthode utilisée pour la prévision du brouillage suppose que le rayonnement n'est jamais inférieur à celui d'une antenne dipôle en espace libre ayant la même puissance de rayonnement (voir la Recommandation 80). Une autre méthode est celle qu'a adoptée la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (CAMR HFBC(1)) Genève, 1984, dans laquelle le rayonnement en dehors du faisceau principal peut avoir des valeurs de gain comprises entre -8 et -21 dBi, selon le type d'antenne.

2.3 *Incidence des structures de support ainsi que des antennes, des pylônes et des bâtiments situés à proximité sur la qualité de fonctionnement des antennes*

Au Canada, un grand nombre de travaux (modélisation numérique, modélisation expérimentale et mesures en vraie grandeur) ont porté sur le rayonnement secondaire dû aux pylônes, aux immeubles et aux lignes électriques sur le diagramme de directivité des antennes de radiodiffusion en ondes hectométriques [Belrose, 1983]. Ces travaux soulignent l'importance que revêt la prise en compte des effets des structures de support et d'objets conducteurs situés à proximité sur le diagramme des antennes en ondes hectométriques et décamétriques.

Les antennes filaires, telles que les antennes dipôles et les antennes cadres sont le plus couramment utilisées pour les radiocommunications dans la partie inférieure de la bande des ondes décamétriques. Ces antennes sont habituellement supportées par des pylônes métalliques mis à la terre qui ne font pas partie de l'antenne. Toutefois, ces pylônes peuvent avoir une résonance naturelle (hauteur égale à 1/4 ou à 3/4 d'une longueur d'onde) à la fréquence de fonctionnement ou proche de celle-ci, et leur présence peut donc affecter notablement la directivité de l'antenne même dans le cas d'antennes dipôles horizontales [Belrose, 1982].

Pour les antennes à large bande, comme les antennes en cône inversé qui exigent un support plus complexe et également en raison de la large bande de fréquences utilisée, il convient d'être très prudent lors de la conception électrique afin d'éviter des résonances dans les câbles employés pour le haubanage de ces antennes (même si l'on utilise des pylônes en bois). Le fonctionnement de certaines antennes en cône inversé produites commercialement a posé des problèmes [Wilson, 1983].

Les immeubles, qu'ils soient conducteurs ou non, comportent souvent une structure métallique; de toute façon, les fils mis à la terre des systèmes électriques nécessaires pour l'éclairage et les appareils électriques forment un réseau qui peut avoir une résonance en ondes hectométriques et dans la partie inférieure de la bande des ondes décamétriques.

Les lignes électriques produisent un fort rayonnement secondaire en ondes hectométriques, étant donné que les pylônes de soutien sont mis à la terre et qu'ils sont habituellement reliés à leur extrémité par des fils aériens servant de paratonnerre. Les boucles formées par ces lignes électriques peuvent avoir une résonance à certaines fréquences en ondes hectométriques.

Alors que l'on n'a pas envisagé auparavant l'influence des structures de support, lors de la prévision des trajets de propagation de l'onde ionosphérique, cette influence peut être importante et il est nécessaire d'en tenir compte. Dans un calcul numérique précis de modélisation, on peut, à l'aide de la méthode des moments (MOM) dont il a été question plus haut, prendre en compte ces effets ainsi que ceux de structures conductrices plus éloignées, telles que pylônes, antennes, bâtiments et lignes électriques inutilisés.

2.4 *Polarisation*

Les ondes ionosphériques descendantes sont le plus souvent à polarisation elliptique et, en général, les antennes réagissent aussi bien à la polarisation verticale qu'à la polarisation horizontale. Une antenne réagit surtout à la polarisation pour laquelle elle est conçue lorsqu'elle reçoit des signaux provenant de la direction voulue, mais elle peut être plus sensible à la polarisation orthogonale lorsque les signaux arrivent d'autres directions. Ces considérations valent également pour les antennes d'émission, qui peuvent rayonner en polarisation elliptique dans des directions hors axe. L'information de polarisation est donc importante pour l'évaluation de la couverture assurée par les antennes à fort angle de site et du brouillage causé par des émissions non désirées [CCIR, 1978-82].

2.5 *Ouverture d'antenne*

Si le signal qui parvient au récepteur résulte de plusieurs modes de propagation à différents angles d'arrivée, ou s'il a été modifié par la rugosité de l'ionosphère ou par des effets locaux dus à l'emplacement, le front d'onde ne sera pas plan. En conséquence, une antenne dont l'ouverture est grande par rapport à la longueur d'onde aura un gain équivalent plus petit que si le front de l'onde était plan.

3. Informations indispensables pour la prévision du signal utile

Dans certains cas, on pourra admettre que les antennes sont alignées le long d'un arc de grand cercle et que les polarisations utilisées sont adaptées au circuit, ou que l'on peut calculer l'affaiblissement par couplage de polarisation (voir la Recommandation 435). On pourra alors faire une première évaluation de la qualité d'un circuit en l'absence de brouillage, avec seulement deux caractéristiques d'antenne: la valeur maximale du gain de puissance et le diagramme de rayonnement vertical dans le plan du lobe principal. Si l'angle d'azimut de l'antenne d'émission ou de l'antenne de réception n'est pas optimalisé le long du grand cercle, il faudra prévoir une marge dans le diagramme de rayonnement horizontal.

4. Renseignements disponibles

Il n'existe aucune source de renseignements immédiatement disponibles qui donne toutes les caractéristiques d'antenne nécessaires à l'établissement d'un modèle détaillé, surtout en ce qui concerne la contrapolarisation.

L'Atlas de diagrammes d'antennes du CCIR (1984) donne des valeurs de gain et de directivité pour des réseaux de doublets demi-onde horizontaux et des antennes losanges horizontales situées sur un sol plat, homogène et imparfaitement conducteur, de conductivité $\sigma = 0{,}01$ S/m et de constante diélectrique $\varepsilon = 4{,}0$ (sol de conductivité moyenne) à une fréquence de 10 MHz. En outre, le Secrétariat du CCIR a établi deux programmes informatiques «HFARRAYS» et «HFRHOMBS» pour le calcul des diagrammes de l'angle d'azimut et/ou de l'angle de site de ces antennes situées sur des sols de conductivité imparfaite. Les principales caractéristiques de ces programmes sont:

- la possibilité de les utiliser sur une vaste gamme de micro-ordinateurs,
- le degré élevé d'interaction avec l'opérateur, ce qui permet aux personnes peu familiarisées avec l'informatique de les employer.

On peut utiliser sur des micro-ordinateurs [Li et autres, 1983] le MiniNEC, version simplifiée du Code électromagnétique numérique (NEC), mis au point par Burke et Miller [1984], mais seulement dans le cas d'un sol de conductivité parfaite. Les versions de MiniNEC, actuellement mises au point, tiennent compte entre autres des effets du sol de conductivité finie au-dessous de l'antenne, mais seulement dans le cas où l'antenne n'est pas installée au sol ou n'est pas reliée à un système de mise à la terre.

Le Recueil du CCIR «Diagrammes d'antennes» (1978) donne la directivité et le gain de réseaux d'éléments rayonnants verticaux et horizontaux au-dessus d'un sol parfait, avec des facteurs de correction pour certaines valeurs types des caractéristiques du sol à 1, 10 et 20 MHz. La première édition des «Diagrammes d'antennes» (Genève, 1953, avec suppléments jusqu'en 1966) fournit des renseignements semblables sur d'autres types d'antennes horizontales placées au-dessus d'un sol parfaitement conducteur. On trouvera des renseignements supplémentaires dans le «Manuel du CCIR sur les antennes pour ondes décamétriques à effet directif» (Genève, 1966). Smith [1969] a publié une méthode de calcul des caractéristiques de directivité des antennes verticales à pylônes multiples. Les formules théoriques du gain de 15 types d'antennes utilisées fréquemment en ondes décamétriques sont données par Barghausen et autres [1969]. Ces formules s'appliquent à des antennes placées au-dessus d'un sol horizontal uniformément plat, dont la conductivité a une valeur finie. Le Secrétariat du CCIR dispose d'un programme d'ordinateur (voir la Résolution 63) qui permet d'évaluer le gain en fonction de la fréquence, de l'angle de site et de l'azimut, par rapport à l'orientation de l'antenne.

La Recommandation 435 contient des renseignements sur les diagrammes de rayonnements verticaux et les gains d'antennes unipolaires ayant une épaisseur courante et des longueurs variables, placées au-dessus d'un sol typique ($\sigma = 10^{-2}$ Sm^{-1}). On y trouve également la description d'une méthode qui permet de calculer l'effet produit quand on installe une antenne à proximité de la mer («gain dû à la mer») dans les bandes de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques. Le Rapport 265 spécifie des «facteurs d'antennes» qui permettent de tenir compte des imperfections du sol, pour les fréquences comprises entre 30 et 500 kHz. On trouvera des renseignements semblables pour les fréquences comprises entre 0,2 et 1,5 MHz dans le Rapport 401.

La technique dite de la «méthode des moments» (MOM) pour calculer les caractéristiques (par exemple, la directivité et le gain pour des polarisations nominales et croisées, l'impédance terminale et la perte par défaut d'adaptation) des antennes filaires placées au-dessus d'un sol irrégulier est particulièrement utile quand il s'agit d'antennes non standards ou d'un sol non typique. Ces modèles peuvent être utilisés pour calculer l'efficacité des dispositifs de mise à la terre en câbles enterrés ou aériens [Burke et Miller, 1984]. Les données de conductivité et de permittivité du sol établies pour calculer le champ de l'onde de sol (voir la Recommandation 527) peuvent être utilisées dans ces modèles MOM; on peut aussi mesurer les caractéristiques électriques du sol à proximité immédiate de l'antenne aux fréquences considérées, au moyen des méthodes décrites dans le Rapport 879.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON, J. B. [1965] Influence of surroundings on vertically polarized log-periodic antennas. *Teleteknik*, Vol. IX, **2**, 33-40.

BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W., PROCTOR, L. L. et SHULTZ, L. D. [1969] Predicting long-term operational parameters of high-frequency sky-wave telecommunication systems. ESSA Tech. Rep. ERL 110-ITS 78, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

BELROSE, J. S. [décembre 1982] The effect of supporting structures on simple wire antennas. *QST*, Vol. LXVI, 32-35, et *QST* [octobre 1984], Vol. LXVIII, 42.

BELROSE, J. S. [1983] VLF, LF and MF antennas. Chapitre 15. *IEE Handbook of Antenna Design*, Vol. 2, 553-662. Eds. Rudge, Milne, Olver et Knight. Peter Peregrinus Ltd., Londres, Royaume-Uni.

BELROSE, J. S. [1984] On modelling and measurements in full scale. AGARD LS No. 131, *The Performance of Antennas in their Operational Environment.* NASA Accession No. N84-12367. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BURKE, G. J. et MILLER, E. K. [1984] Modelling antenna near to and penetrating a lossy interface. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-32, **10**, 1040-1049.

HAGN, G. H. et VAN DER LAAN, J. E. [1970] Measured relative responses toward the zenith of short-whip antennas on vehicles at high frequency. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-19, **3**, 230-236.

HARRINGTON, R. F. [1968] *Field Computation by Moment Methods.* The Macmillan Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

KNIGHT, P., DAVIES, R. E. et MANTON, R. G. [1964] Vertical radiation patterns of h.f. curtain arrays on plateau sites. *Proc. IEE*, Partie III, 421-427.

KUBANOV, V. P. [1980] Analyses de rideaux d'antennes situées sur le sol en pente d'étendue limitée (en russe). *Trudy NIIR*, **3**, 12-17.

KUBANOV, V. P. et SHEREDKO, E. Y. [1976] Effet des irrégularités du sol sur les caractéristiques des rideaux d'antennes décamétriques en phase (en russe). *Izvestiya VUZOV, Seriya Radioelektronika*, **11**, 48-51.

LI, S. T., ROCKWAY, J. W., LOGAN, J. C. et TAM, W. S. [1983] *MiniNEC in Microcomputer Tools for Communications Engineering*, 21-52. Artech House Inc., Dedham, MA 02026, Etats-Unis d'Amérique.

MILLER, E. K. [1984] Numerical modelling techniques for antennas. AGARD LS No. 131, *The Performance of Antennas in their Operational Environment.* NASA Accession No. N84-12367. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

OTT, R. H. [1971] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain, 2. *Radio Sci.*, Vol. 6, 4, 429-435.

OTT, R. H. [1984] Calculation of ground wave attenuation over irregular, inhomogeneous, layer media using program Wagner. AGARD LS No. 131, *The Performance of Antennas in their Operational Environment*, 3-1 à 3-17. NASA Accession No. N84-12367. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

OTT, R. H., VOGLER, L. E. et HUFFORD, G. A. [1979] Ground wave propagation over irregular, inhomogeneous terrain: comparisons of calculations and measurements. US Dept. of Commerce, Research Report No. NTIA-REPORT-79-20, NTIS Accession No. PB-298-66B/AS. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

POGGIO, A. J. et MILLER, D. K. [1973] Integral equation solutions of three-dimensional scattering problems. *Computer Techniques for Electromagnetics.* Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

RADFORD, M. F. [1983] High frequency antennas. Chapitre 16, *IEE Handbook of Antenna Design*, Vol. 2, 663-724. Eds. Rudge, Milne, Olver et Knight. Peter Peregrinus Ltd., Londres, Royaume-Uni.

SMITH, C. [1969] *Theory and design of directional antennas.* Smith Electronics Inc., Cleveland, Ohio, Etats-Unis d'Amérique.

WILSON, Q. C. [1983] HF equipment: receivers, transmitters, synthesizers and peripherals. AGARD LS No. 127, *Modern HF Communications.* NASA Accession No. N83-30862. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1978-82]: Doc. 6/223 (URSS).

RAPPORT 892-1 *

CALCUL DE LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES RADIOÉLECTRIQUES EN ONDES DÉCAMÉTRIQUES

(Programme d'études 28D/6)

(1982-1986)

1. Introduction

La principale caractéristique fournie par la plupart des méthodes de prévision de la propagation des ondes décamétriques est la valeur prévue de la puissance du signal ou du champ correspondant. Pourtant, comme il est souligné par exemple dans le Rapport 729 et dans le Supplément au Rapport 252, les données de champ ne suffisent pas pour quantifier entièrement la qualité de fonctionnement d'un service radioélectrique.

La fiabilité prévue est l'une des caractéristiques d'un système radioélectrique à ondes décamétriques qui peut servir de facteur de qualité. D'une manière générale, la fiabilité est définie comme la probabilité pour qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte par le système. Elle est exprimée comme le pourcentage de temps d'un mois pendant lequel cette qualité de fonctionnement est censée être égalée ou dépassée. Des définitions plus précises des différents types de fiabilité sont données dans l'Appendice I.

Les fiabilités prévues sont utiles pour l'optimisation de la conception des antennes et pour le choix des combinaisons de fréquences préférées ainsi que des puissances d'émission nécessaires pour atteindre une qualité de fonctionnement désirée. Il faut donc disposer de méthodes précises pour évaluer les valeurs de fiabilité et pour appliquer ces valeurs à l'évaluation de la qualité de fonctionnement des systèmes radioélectriques. A l'heure actuelle, il n'existe pas de procédures agréées. C'est pourquoi le présent Rapport décrit les principales méthodes de calcul employées. Presque toutes ces méthodes impliquent des hypothèses ou des approximations, en raison de l'insuffisance des données disponibles en ce qui concerne la corrélation entre les divers modes pouvant exister simultanément sur un circuit donné.

2. Eléments nécessaires au calcul de la fiabilité

Pour le calcul des diverses valeurs de fiabilité, il faut disposer des éléments suivants:

- Estimations de la puissance reçue pour chaque mode de propagation, ou de la puissance totale reçue, prévue à l'heure spécifiée en un emplacement donné pour une fréquence donnée. Cette puissance s'exprime comme la médiane mensuelle des valeurs médianes horaires. Les méthodes permettant d'obtenir ces estimations sont décrites dans le Rapport 252, le Supplément au Rapport 252 et dans le Rapport 894.
- Estimations de la puissance de bruit reçue à l'emplacement considéré pour une fréquence et une largeur de bande données, exprimée comme la médiane mensuelle des valeurs médianes horaires. Les méthodes permettant d'obtenir ces estimations sont décrites dans les Rapports 322 et 258.

---

* Le Directeur du CCIR est prié de transmettre, pour information, ce Rapport à la seconde session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiofiffusion (CAMR HFBC(2)).

- Estimations de la variabilité du signal et de la puissance de bruit. Ces valeurs sont exprimées sous forme d'écarts entre déciles supérieur et inférieur par rapport aux valeurs médianes. Des méthodes d'estimation de ces valeurs figurent dans les Rapports 266, 322 et 258.
- Estimations du rapport signal/bruit requis pour obtenir des qualités de fonctionnement spécifiées. Ce rapport correspond au rapport médian horaire pris pour des conditions de stabilité. On trouvera dans la Recommandation 339 un tableau des valeurs requises pour ce rapport signal/bruit.
- Estimations du rapport signal/brouillage requis pour obtenir des qualités de fonctionnement spécifiées. Ce rapport est pris pour des conditions de stabilité. Le Rapport 525 décrit des méthodes permettant d'obtenir le rapport signal/brouillage requis.

3. Calcul de la fiabilité de mode

La fiabilité de mode R_m est définie à l'Appendice I. Dans l'hypothèse où la probabilité de réflexion du mode est indépendante du champ du signal, on a:

$$R_m = P_r \cdot P_{S/N} \tag{1}$$

où P_r est la disponibilité de mode et $P_{S/N}$ est la probabilité conditionnelle pour que le rapport de puissance signal/bruit requis soit atteint ou dépassé, en supposant que le mode existe. On peut utiliser la formule (1) pour évaluer R_m lorsque $P_{S/N}$ est déterminé à l'aide d'une méthode de prévision du champ donnant la valeur médiane de celui-ci, pour un échantillon réduit aux cas où l'on juge que la réflexion se produit (voir, par exemple, la méthode du Rapport 252). Dans le cas où la prévision du signal donne la médiane pour la totalité de la durée à considérer (voir, par exemple, les méthodes du Rapport 894 et le Supplément au Rapport 252), on a alors:

$$R_m = P'_{S/N} \tag{2}$$

où $P'_{S/N}$ étant la fraction du temps pendant laquelle le rapport signal/bruit dépasse la valeur requise.

P_r est donné au § 4.2 du Supplément au Rapport 252. On peut appliquer comme suit les équations de Bradley et Bedford [1976] pour obtenir $P_{S/N}$:

- pour $S/N \leqslant (S/N)_m$

$$P_{S/N} = 1{,}3 - \frac{0{,}8}{1 + \left(\dfrac{(S/N)_m - S/N}{G_l} \right)} \tag{3a}$$

Lorsque la valeur obtenue dépasse 1, prendre la valeur 1.

- pour $S/N > (S/N)_m$

$$P_{S/N} = \frac{0{,}8}{1 + \left(\dfrac{S/N - (S/N)_m}{G_u} \right)} - 0{,}3 \tag{3b}$$

Lorsque la valeur obtenue est négative, prendre la valeur 0.

Dans ces formules:

S/N: rapport signal/bruit requis (dB)

$(S/N)_m$: valeur médiane mensuelle estimée de ce rapport (dB).

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de corrélation entre les variations d'amplitude du signal et du bruit:

$$G_u = \sqrt{S_{uh}^2 + S_{ud}^2 + N_{lh}^2 + N_{ld}^2} \quad \text{dB} \tag{4a}$$

et

$$G_l = \sqrt{S_{lh}^2 + S_{ld}^2 + N_{uh}^2 + N_{ud}^2} \quad \text{dB} \tag{4b}$$

où:

$S_{uh}(N_{uh})$: écart du décile supérieur du signal (du bruit) par rapport à la valeur médiane horaire du champ, dû aux variations au cours d'une heure (dB)

$S_{lh}(N_{lh})$: écart du décile inférieur du signal (du bruit) par rapport à la valeur médiane horaire du champ, dû aux variations au cours d'une heure (dB)

$S_{ud}(N_{ud})$: écart du décile supérieur du signal (du bruit) par rapport à la valeur médiane horaire du champ, dû aux variations d'un jour à l'autre (dB)

$S_{ld}(N_{ld})$: écart du décile inférieur du signal (du bruit) par rapport à la valeur médiane horaire du champ, dû aux variations d'un jour à l'autre (dB).

Bradley et Lockwood [1982] ont fait des calculs qui montrent l'influence de la fréquence sur la fiabilité de mode, quand l'affaiblissement de transmission du signal comprend un terme pour «l'affaiblissement au-dessus de la MUF», fonction du rapport de la fréquence de l'onde à la MUF de référence du mode, et un autre terme pour l'affaiblissement dû à l'absorption qui, en dB, est inversement proportionnel au carré de la fréquence. Cette étude permet de combiner les effets des variations d'un jour à l'autre de la MUF de référence qui affectent le support du mode avec les variations d'un jour à l'autre des autres termes d'affaiblissement. Bradley [1983] a montré que, aux fréquences supérieures à la médiane mensuelle de la MUF de référence, le support du mode est le facteur dominant dont dépend la fiabilité de mode.

Une autre méthode de calcul de la fiabilité de mode consiste à comparer la médiane mensuelle du niveau horaire médian du signal avec la médiane mensuelle du bruit horaire médian. On peut estimer la distribution d'un jour à l'autre des rapports S/N horaires médians en combinant cette médiane avec les déciles supérieur et inférieur. En associant cette distribution à un rapport S/N horaire médian spécifié, on obtient une estimation du pourcentage de jours pendant les mois où l'on s'attend à ce que ce rapport spécifié soit atteint ou dépassé. On peut admettre que ce pourcentage est égal à la probabilité pour que le rapport S/N horaire médian spécifié soit atteint à un instant donné.

4. Calcul de la fiabilité de circuit

Une expression peut être donnée [Liu et Bradley, 1985] pour le cas général de n modes possibles, montrant que la fiabilité de circuit dépend du degré de corrélation entre les occurrences des modes et entre les amplitudes des modes. On estime que la probabilité pour que trois modes ou plus aient des amplitudes comparables – chaque mode contribuant de façon significative à la fiabilité de circuit – est faible. Dans la pratique, pour simplifier les calculs, on envisage de ramener le cas général à deux modes seulement. Dans ce cas, l'expression devient:

$$R_c = Q_1 P_1 + Q_2 P_2 + Q_{12} P_{12} \tag{5}$$

R_c étant la fiabilité du circuit, Q_{ij} la probabilité pour que les modes i et j soient présents simultanément, et P_{ij} la probabilité pour que ces modes, quand ils sont présents, conduisent au dépassement du rapport signal/bruit requis.

L'expression (5), même simplifiée, oblige à calculer des intégrales doubles pour Q_{12} et P_{12}, méthode trop longue pour les prévisions courantes. Il faut donc appliquer des méthodes simplifiées et approchées, du type de celles qui sont indiquées ci-dessous.

4.1 *Méthode 1 (HFMUFES)*

Barghausen et autres [1969] calculent la fiabilité de circuit comme étant égale au produit des maximums de chacune des valeurs de P_r et $P_{S/N}$. Ces valeurs qu'on utilise dans le calcul n'ont pas besoin d'être associées au même mode de propagation.

4.2 *Méthode 2 (IONCAP)*

Dans le programme de prévision IONCAP [Teters et autres, 1983] pour calculer la puissance globale des composantes du signal qui correspondent à tous les modes de propagation, on fait la somme des puissances de ces composantes. Une telle somme n'a de sens que si les relations de phase des composantes du signal prises deux à deux sont toujours aléatoires. On admet que la moyenne du rapport signal/bruit (en dB) est égale à la différence des valeurs moyennes (en dB) de la puissance du signal et de la puissance du bruit, et que la variance de ce rapport est égale à la somme des variances de la puissance du signal et de la puissance du bruit. La fiabilité de circuit se calcule en pourcentage des jours d'un mois pendant lesquels on disposera d'un rapport signal/bruit au moins égal à une certaine valeur spécifiée. Dans cette méthode, on ne tient pas compte directement de la proportion des jours d'un mois pendant lesquels les différents modes se réfléchissent sur l'ionosphère. L'hypothèse inhérente à cette méthode simple est la suivante: les valeurs adoptées pour les variations d'un jour à l'autre de la puissance du signal, fondées sur les données d'observation, tiennent automatiquement compte de la variabilité de l'ionosphère qui affecte les supports de mode.

4.3 *Méthode 3*

Dans la méthode décrite par Tchernov [1969], la fiabilité de circuit (compte tenu du bruit et/ou du brouillage) est calculée en admettant que le brouillage est sensiblement plus élevé que le bruit. Les lois statistiques de la distribution du signal et du brouillage sont prises en considération, ainsi que les incertitudes de prévision dans l'évaluation de valeurs médianes des puissances surfaciques du signal et du brouillage.

4.4 *Méthode 4*

Dans cette méthode, la fiabilité de circuit de référence est calculée en prenant la moyenne de deux extrêmes, l'un correspondant à une surestimation et l'autre à une sous-estimation. La sous-estimation est la fiabilité $P_r \cdot P_{S/N}$ du mode dont la fiabilité est la plus forte, tous les autres modes étant ignorés. La surestimation se fonde sur l'hypothèse que tous les modes sont statistiquement indépendants, en sorte que la probabilité d'une communication établie par un mode au moins est égale à l'unité moins le produit des probabilités pour que chaque mode ne permette pas d'établir la communication. En l'absence d'informations adéquates au sujet de la corrélation entre modes, il apparaît que la moyenne entre ces deux estimations fournit une évaluation acceptable de la fiabilité de circuit de référence.

4.5 *Méthode 5 (CRC)*

La méthode utilisée avec le système de prévision du CRC (Canada) combine différemment les divers modes de propagation [Petrie, 1981]. En faisant l'hypothèse que, si une propagation est possible par plusieurs bonds, il existe nécessairement une propagation par un nombre moins élevé de bonds, on peut calculer pour diverses combinaisons de modes la probabilité pour qu'un signal d'une certaine puissance soit reçu. Pour chaque combinaison, on calcule la puissance moyenne du signal en additionnant les puissances des signaux appropriées. Pour que cette addition ait un sens, il faut que les signaux qui se propagent dans les différents modes soient indépendants.

La fonction de distribution résultant de la puissance de signal $P(S)$ pour toutes les combinaisons de modes s'obtient par sommation des fonctions de distribution de toutes les combinaisons. Si l'on connaît la fonction de distribution de la puissance de bruit $P(N)$, on peut calculer la fiabilité de circuit par une valeur spécifiée du rapport signal/bruit, en admettant que $P(S)$ est indépendant de $P(N)$. On suppose que les puissances de signal et les puissances de bruit ont une distribution normale.

4.6 *Méthode 6 (Maslin)*

Maslin [1978] a examiné les approches possibles de la sommation des fiabilités pour les différents modes afin d'estimer la fiabilité de circuit. Les puissances de signal peuvent s'ajouter si l'on admet que la relation de phase entre les signaux dans les différents modes est aléatoire. En général, la marge de tolérance pour tenir compte de la réflexion ionosphérique du signal doit faire intervenir un certain degré de corrélation entre les différents modes, qui dépend de la corrélation spatiale entre les variations d'un jour à l'autre de l'ionisation. L'auteur donne les équations correspondant au cas de l'absence de corrélation entre les modes et à celui d'un coefficient de corrélation donné.

4.7 *Méthode 7*

Dans cette méthode [Liu et Bradley, 1985], on admet que les valeurs journalières de la MUF de référence et celles du rapport signal/bruit (exprimées en décibels) obéissent à une loi de distribution normale. On applique une approximation de la distribution normale bivariante et on admet une sommation en puissance des signaux des différents modes, en négligeant toute corrélation entre les amplitudes. On néglige également la proportion des cas où le rapport signal/bruit combiné dépasse la valeur spécifiée pour les cas où les contributions séparées des modes ne provoquent pas de dépassement. Si on désigne par ρ_{12} le coefficient de corrélation entre les MUF des modes, l'expression (5) devient:

$$R_c = Q_1 P_1 + Q_2 P_2 \left\{1 - \left[\rho_{12}^2 + (1 - \rho_{12}^2) Q_1\right] P_1\right\} \quad (6)$$

Ici, Q_1 désigne la probabilité pour que le mode 1 soit présent, seul ou accompagné du mode 2, et Q_2 est la probabilité pour que le mode 2 soit présent, seul ou accompagné du mode 1. Les modes sont choisis de telle façon que Q_1 soit supérieur à Q_2.

Dans le cas de deux modes F2, il est suggéré d'utiliser l'équation (6) avec $\rho_{12} = 0{,}8$.

Quand des modes sont réfléchis par des couches différentes (sauf dans le cas des couches E et F1), on admet que les modes ne sont pas corrélés ($\rho_{12} = 0$), ce qui donne:

$$R_c = Q_1 P_1 + Q_2 P_2 (1 - Q_1 P_1) \quad (7)$$

Pour deux modes complètement corrélés ($\rho_{12} = 1$), par exemple, deux modes E ou un mode E et un mode F1, l'expression (6) se réduit à:

$$R_c = Q_1 P_1 + Q_2 P_2 (1 - P_1) \quad (8)$$

4.8 *Méthode 8*

Cette méthode, élaborée à la première session de la CAMR HFBC, implique que l'on connaisse la médiane du champ du signal, ainsi que les écarts des déciles supérieur et inférieur de l'évanouissement à long terme (de jour en jour) et à court terme (dans l'heure) du signal. Pour le bruit de fond, il est tenu compte du bruit atmosphérique, du bruit artificiel et du bruit intrinsèque du récepteur; le champ médian du bruit est évalué comme étant la plus élevée de ces trois composantes. On ne tient pas compte de la variabilité du bruit et les écarts des déciles du rapport signal/bruit sont considérés comme étant la somme (valeur efficace) des écarts correspondants du signal de jour en jour et dans l'heure, toutes les quantités étant exprimées en décibels. Dans l'estimation du pourcentage de temps où le rapport signal/bruit requis est obtenu, on suppose que ce rapport, exprimé en décibels, suit un couple de distributions normales situées de part et d'autre de la médiane.

5. Calcul de la fiabilité de circuit en ondes décamétriques en termes de champ minimal utilisable

Cette méthode, élaborée et adoptée à la première session de la CAMR HFBC, est analogue à la méthode 8 du § 4.8 dans la mesure où il s'agit de déterminer la valeur des déciles de l'amplitude du signal découlant des variabilités conjuguées de jour en jour et dans l'heure. On suppose ensuite que l'intensité du signal suit un couple de distributions normales situées de part et d'autre de la médiane; la fiabilité de référence de circuit est alors donnée par le pourcentage du temps pendant lequel le champ minimal utilisable est dépassé (voir la Recommandation 499).

6. Comparaison des méthodes de calcul de la fiabilité de circuit

Pour les variations d'un jour à l'autre, supposées suivre une loi en χ^2, des valeurs de la MUF de référence et de la combinaison de tous les autres facteurs d'affaiblissement, les valeurs de la fiabilité de circuit fournies par la méthode de Bradley et Lockwood [1982] dans le cas d'un seul mode, ont été comparées aux valeurs correspondantes fournies par les méthodes 1 et 2. Avec la méthode 2, les résultats sont généralement concordants à ± 0,1 près, mais la méthode 1, fondée sur le produit de deux probabilités, sous-estime gravement la fiabilité aux fréquences supérieures à la médiane mensuelle de la MUF de référence.

La fiabilité de circuit calculée par les méthodes 1, 4 et 5 a été comparée dans le cas de divers niveaux supposés du signal et rapports signal/bruit pour deux ou trois modes. Pour faciliter les calculs, on a adopté pour les trois méthodes une fonction de distribution normale pour représenter la variation d'un jour à l'autre de la puissance du signal de part et d'autre de sa médiane mensuelle. On a supposé partout un écart type mensuel de 7 dB tant pour la puissance du signal que pour celle du bruit. On a constaté entre les valeurs de fiabilité obtenues, d'une part, avec la méthode 5 et, d'autre part, avec chacune des deux autres méthodes, les différences médianes suivantes, avec les déciles supérieur et inférieur correspondants:

TABLEAU I

	Méthode 5-Méthode 1	Méthode 5-Méthode 4
Différence médiane	+0,01	0,00
Décile supérieur	0,06	0,03
Décile inférieur	0,13	0,06

Alors que la différence médiane est faible pour les deux cas, les déciles pour la méthode 1 sont presque deux fois plus élevés que pour la méthode 4. Les calculs de la méthode 5 sont bien plus longs que ceux des méthodes 1 et 4.

La méthode 3 qui tient compte du brouillage donne des valeurs de fiabilité plus faibles que les autres méthodes qui n'en tiennent pas compte.

7. Calcul de la fiabilité de réception

La fiabilité de réception en ondes décamétriques est analogue à la fiabilité de circuit mais on suppose qu'il est possible d'utiliser une combinaison de fréquences. Plusieurs méthodes, qui ont été proposées pour calculer la fiabilité de réception, sont décrites ci-dessous.

7.1 *Méthode 3*

Lorsqu'on transmet simultanément la même information sur plusieurs fréquences, cette méthode permet d'estimer la probabilité de réception satisfaisante sur une fréquence au moins, à supposer qu'il n'existe pas de corrélation entre les rapports signal/(bruit + brouillage) aux différentes fréquences [Tchernov, 1982]. Cette hypothèse vaut surtout en cas de brouillage causé par d'autres stations.

7.2 *Méthode 4*

Comme pour le calcul de la fiabilité de circuit, des estimations inférieure et supérieure de la fiabilité de réception sont calculées pour chaque groupe de fréquences examiné dans le cas d'un circuit en ondes décamétriques.

Pour chaque groupe, on examine les fiabilités de circuit possibles sur chaque fréquence pendant une période spécifiée et on choisit la fiabilité maximale. Cela revient à sous-estimer la fiabilité de réception puisqu'on suppose qu'il n'y a pas de contribution de toute autre fréquence. Une valeur supérieure de la fiabilité de réception peut être calculée en admettant que les fiabilités de circuit sur chaque fréquence sont indépendantes. La fiabilité de réception estimée est alors la moyenne de ces deux valeurs.

7.3 *Méthode 5*

Pour calculer la fiabilité de réception pour diverses combinaisons de fréquences, cette méthode utilise des informations sur un mode de référence, fondées sur l'hypothèse supplémentaire que la réflexion à une fréquence par l'intermédiaire d'un mode donné suppose une réflexion à une fréquence inférieure par l'intermédiaire du même mode.

8. Calcul de la fiabilité de service de référence

Pour calculer la fiabilité de service de référence, il faut choisir des échantillons d'emplacements de réception dans la zone géographique intéressée et décider quel doit être le pourcentage de ces emplacements, nécessaire à ce calcul. La fiabilité de réception de référence est calculée pour chaque emplacement échantillon et la fiabilité de service de référence est celle qui est égalée ou dépassée au pourcentage requis d'emplacements échantillons.

9. Calcul des fiabilités globales de circuit, de réception et de service

Pour calculer la fiabilité globale de circuit, on procède de la même manière que pour calculer la fiabilité de référence, à cela près que l'on additionne les puissances reçues des émetteurs brouilleurs potentiels, puissances dont on compare la somme au signal disponible afin de déterminer la distribution, dans l'intervalle d'une heure et d'un jour à l'autre, des valeurs médianes horaires du rapport S/I nécessaire à l'obtention de la qualité de fonctionnement requise pour déterminer le pourcentage de temps dans le mois, pendant lequel on prévoit que le circuit fonctionnera avec succès en présence de brouillage seulement. On compare ce pourcentage à la fiabilité de circuit de référence, la fiabilité globale de circuit correspondant au plus faible de ces pourcentages. (Un calcul plus précis fait intervenir la combinaison du bruit et du brouillage pour déterminer la distribution du rapport $S/(N + I)$, mais tant que les valeurs requises pour ce rapport ne seront pas associées à des valeurs de qualité de fonctionnement spécifiées, cette méthode ne sera pas considérée comme pratique.)

De la même manière qu'avec les méthodes utilisées pour le calcul des fiabilités de référence de service et de réception à partir du rapport S/N, on peut également calculer les fiabilités globales de réception et de service à partir de distributions supposées des médians horaires des rapports S/I ou $S/(N + I)$.

10. Utilisation des estimations de fiabilité pour l'exploitation

Les informations sur la fiabilité obtenues par l'une des méthodes qui viennent d'être décrites, peuvent servir à choisir les bandes de fréquences appropriées pour le service requis en ondes décamétriques. La bande de fréquences optimale est déterminée en calculant, pour chaque bande de fréquences, la fiabilité de circuit pendant les périodes considérées et en choisissant la bande de fréquences qui offre la fiabilité moyenne maximale.

Comme complément optimal à une, deux, trois bandes ou plus sans tenir compte des brouillages, on choisit celui qui offre la fiabilité de réception maximale pendant les périodes d'essai considérées. On peut alors comparer les valeurs de la fiabilité déterminées pour ces compléments. Le complément qui fournit la fiabilité requise avec le nombre minimal de bandes de fréquences peut être choisi pour répondre aux exigences particulières du service en ondes décamétriques.

Pour les assignations de fréquences, il faut tenir compte de l'effet du brouillage et les fiabilités de circuit et de réception (compte tenu du bruit et du brouillage) peuvent être utilisées (voir l'Appendice I).

Pour déterminer la fiabilité d'un service, il faut aussi considérer des échantillons de durée prélevés pendant la période désirée et des échantillons d'emplacement prélevés à l'intérieur de la zone géographique intéressée. La meilleure façon d'exprimer la fiabilité de service consiste probablement à établir une distribution de ces échantillons durée-emplacement. Si on souhaite avoir une seule mesure, cette distribution peut être associée à une fiabilité de réception requise, pour déterminer un pourcentage des échantillons durée-emplacement ou, inversement, on peut adopter une valeur fixe du pourcentage de ces échantillons et utiliser la fiabilité de réception correspondante comme mesure de la fiabilité du service.

On trouvera dans le § 7 du Rapport 894-1 [CCIR, 1982-86] des renseignements supplémentaires concernant les applications de la fiabilité au service de radiodiffusion à ondes décamétriques.

11. Résumé

Le présent Rapport expose plusieurs méthodes de calcul des fiabilités d'un système de radiocommunication en ondes décamétriques. Ces méthodes nécessitent un complément d'étude qui doit permettre d'en déterminer l'exactitude et la facilité de mise en œuvre dans les méthodes de prévision.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W., PROCTOR, L. L. et SCHULTZ, L. D. [1969] Predicting long-term operational parameters of high-frequency sky-wave telecommunication systems. ESSA Tech. Rep. ERL 110-ITS 78, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

BRADLEY, P. A. [1983] Signal and noise variability in high-frequency sky-wave radio service planning. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 10-1 à 10-13. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BRADLEY, P. A. et BEDFORD, C. [1976] Prediction of HF circuit availability. *Electron. Lett.*, **12**, 32-33.

BRADLEY, P. A. et LOCKWOOD, M. [1982] Simplified estimation of HF sky-wave signal intensity and mode reliability. IEE Conf. Proc. No. 206, 60-64.

LIU, R. Y. et BRADLEY, P. A. [1985] Estimation of HF basic circuit reliability from modal parameters. *Proc. IEE*, Vol. 132, Partie F, 111-118.

MASLIN, N. M. [1978] The calculation of circuit reliability when a number of propagation modes are present. Doc. 79 du GTI 6/1 du CCIR.

PETRIE, L. E. [1981] Selection of a best frequency complement for HF communications. Communications Research Centre, Dept. of Communications, Contract Report No. OER80-00339, Ottawa, Ontario, Canada.

TCHERNOV, Y. A. [1969] Nadiodznost kanala radioveshania (Fiabilité des voies de radiodiffusion). *Trudy NIIR*, **1**, 131-139.

TCHERNOV, Y. A. [1982] Neobkhodimoe tchislo tchastotnykh kanalov v HF diapazone dlya peredatchi adnoy programmy s zadannoy nadëjnostyou (Nombre de voies à ondes décamétriques nécessaires pour transmettre le même programme avec une fiabilité déterminée). *Proc. NIIR*, **3**, 66-72.

TETERS, L. R., LLOYD, J. L., HAYDON, G. W. et LUCAS, D. L. [1983] Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel. *Ionospheric Communications Analysis and Prediction Program User's Manual.* NTIA Report 83-127, NTIS Accession No. PB 85212942. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1982-86]: Doc. 6/138 (Conclusions de la Réunion intérimaire de la Commission d'études 6).

APPENDICE I

Les définitions suivantes ont été formulées pour les besoins du présent Rapport:

1. Expressions concernant l'exploitation et la conception des systèmes radioélectriques en ondes décamétriques

Fiabilité

Probabilité qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte.

Fiabilité de circuit

Probabilité, pour un circuit, qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte avec une seule fréquence.

Fiabilité de réception

Probabilité, pour un circuit, qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte en tenant compte de toutes les fréquences émises, associées au signal souhaité.

Fiabilité de service

Probabilité qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte pour un pourcentage spécifié de la zone de service, compte tenu de toutes les fréquences transmises.

Note 1. – Dans les expressions ci-dessus, on entend par circuit une liaison de transmission entre un émetteur et un récepteur, avec ou sans diversité.

Note 2. – Ces expressions sont qualifiées par les mots «de référence» quand il y a seulement un bruit de fond et par l'adjectif «global» quand il y a un bruit de fond et un brouillage.

Note 3. – Lorsqu'il y a un bruit de fond et un brouillage, ces expressions peuvent se rapporter soit aux effets d'un seul brouilleur, soit à des brouillages multiples provenant d'émissions dans le même canal ou dans le canal adjacent.

Note 4. – Pour de nombreuses applications, il est commode d'adopter comme qualité de fonctionnement spécifiée une valeur donnée du rapport signal/bruit de fond.

Note 5. – Ces expressions se rapportent à une ou plusieurs périodes, qui devraient être indiquées.

Note 6. – Pour un service radioélectrique donné, les définitions ci-dessus peuvent devoir être adaptées aux besoins de ce service. Par exemple, pour des applications en radiodiffusion, le terme fiabilité de service est remplacé par le terme fiabilité de radiodiffusion et la fiabilité est calculée pour un nombre spécifié de points d'essai à l'intérieur de la zone de service.

2. Expressions concernant les techniques de prévision

Fiabilité de mode

Probabilité, pour un circuit, qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte par un seul mode à une seule fréquence.

Disponibilité de mode

Probabilité, pour un seul circuit, qu'un seul mode à une seule fréquence puisse se propager par réfraction ionosphérique exclusivement.

Réalisation de performance de mode

Probabilité, pour un seul circuit, qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte par un seul mode à une seule fréquence, étant admis que le mode peut se propager par réfraction ionosphérique exclusivement.

Note 1. – Les Notes 4 et 5 du § 1 s'appliquent.

RECOMMANDATION 531

EFFETS IONOSPHÉRIQUES QUI INFLUENT SUR LES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATIONS COMPORTANT DES ENGINS SPATIAUX

(Programme d'études 28C/6)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que des effets ionosphériques peuvent avoir une influence sur la conception des systèmes de radiocommunications comportant des engins spatiaux,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

que les renseignements figurant dans les Rapports 262 et 263 soient utilisés, le cas échéant, pour la planification et la conception de ces systèmes.

RAPPORT 263-6

LES EFFETS DE L'IONOSPHÈRE SUR LA PROPAGATION ENTRE LA TERRE ET L'ESPACE

(Programme d'études 28C/6)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Dans la réalisation des liaisons radioélectriques Terre-espace, il faut tenir compte des effets de l'ionosphère et de la troposphère pour les fréquences allant de la bande décamétrique à la bande centimétrique. Les effets de l'atmosphère non ionisée sont étudiés dans le Rapport 564.

Un signal radioélectrique qui pénètre dans l'ionosphère y est modifié par le milieu en raison de la présence d'électrons et du champ magnétique terrestre. Aussi bien des changements à grande échelle dus à la variation de la densité électronique que des irrégularités à petite échelle influent sur ce signal. Les effets subis sont les suivants: scintillation, absorption, variation de la direction d'arrivée, temps de propagation, variation de fréquence et rotation de la polarisation. Les sections suivantes du présent Rapport passent en revue les effets précités, principalement pour les fréquences supérieures à 20 MHz environ.

2. Scintillation

2.1 *Introduction*

Dans le présent Rapport, on entend par «scintillation» des variations d'amplitude, de phase, de polarisation et d'angle d'arrivée, qui se manifestent lorsque les ondes radioélectriques traversent des zones d'irrégularités de la densité électronique dans l'ionosphère. Les scintillations peuvent devenir très sérieuses et peuvent imposer une limite pratique au fonctionnement de certains systèmes de radiocommunication. On a observé des phénomènes de scintillation depuis 20 MHz jusqu'à 12 GHz environ, en couvrant toute la gamme des ondes décimétriques.

On peut caractériser les scintillations par la profondeur des évanouissements et par leur période. L'emploi de la zone de Fresnel permet d'évaluer ces deux caractéristiques dans les conditions où le phénomène de scintillation est faible, à savoir lorsque les fluctuations d'amplitude crête-à-crête ne dépassent pas 8 dB. De nombreux chercheurs [Yeh et autres, 1975; Crane, 1977] ont étudié en détail les conséquences de l'utilisation de la notion de la zone de Fresnel pour les fortes scintillations comme pour les faibles scintillations. Il existe un indice qui permet de comparer utilement entre elles les données relatives aux scintillations; c'est l'«indice de scintillation» S_4, défini comme l'écart-type de la puissance reçue divisée par la moyenne de cette puissance [Briggs et Parkin, 1963].

Dans le phénomène de scintillation, la période d'évanouissement varie dans de très grandes limites et peut atteindre plusieurs minutes [Koster, 1966]; elle dépend à la fois du mouvement apparent des irrégularités par rapport au trajet du rayon et, dans le cas d'une forte scintillation, de l'importance de celle-ci. Pour une forte scintillation, la période d'évanouissement est plus courte que pour une faible scintillation de même vitesse relative. La période d'évanouissement d'une scintillation aux fréquences de l'ordre du gigahertz va d'environ 2 à 15 s [Sessions, 1972; Paulson et Hopkins, 1973; Taur, 1973]. Ces mesures ont eu lieu à la limite des faibles scintillations, alors que l'émetteur et le récepteur étaient stationnaires; les périodes d'évanouissement observées reflètent donc les mouvements des irrégularités de l'ionosphère. On peut définir une mesure plus précise de l'évanouissement par les spectres de puissance tels que les indiquent les mesures, faites au sol, sur des émissions de satellites géostationnaires [Taur, 1976; Whitney et Basu, 1977; Ott, 1977; Umeki et autres, 1977a; Fang et autres, 1978; Fang, 1980] ou de satellites sur orbite basse [Crane, 1976; Fremouw et autres, 1978].

En plus du type normal aléatoire de la scintillation d'amplitude, on observe parfois une sorte d'évanouissement appelé scintillation du type de Fresnel ou quasi périodique, en général symétrique par rapport à un minimum central profond dans le temps. La durée de l'évanouissement varie beaucoup, de quelques secondes à plusieurs minutes. De nombreux cas de scintillation de ce type ont été signalés dans la bande des ondes métriques [Slack, 1972] et on en a observé, plus récemment, en particulier pendant la nuit, au début de l'été, à 1,5 GHz [Karasawa et autres, 1985].

Les irrégularités ionosphériques à petite échelle qui provoquent des scintillations d'amplitude donnent également lieu à des scintillations angulaires. Aux latitudes moyennes, l'ampleur de ces dernières est normalement de quelques dixièmes de milliradian à la fréquence 136 MHz [Bramley, 1974], mais dans les zones équatoriales et aux latitudes élevées (fortes scintillations), on peut s'attendre à trouver des valeurs plus grandes. Ces fluctuations angulaires décroissent elles aussi lorsque la fréquence augmente, mais selon une loi qui dépend de la taille des irrégularités ionosphériques et de leur distance par rapport au récepteur. On n'a pas encore établi d'une façon détaillée, ni expérimentalement ni théoriquement, cette relation avec la fréquence.

2.2 *Influence de la fréquence sur la scintillation*

Si l'on ne dispose pas de résultats obtenus par des mesures directes, il est suggéré, pour les applications techniques, de considérer que S_4 varie comme $f^{-1,5}$.

Des observations [Fremouw et autres, 1978] portant sur 10 fréquences comprises entre 138 MHz et 2,9 GHz émises par le même satellite ont montré que l'indice de scintillation S_4 varie toujours en amplitude comme $f^{-1,5}$, tant que sa valeur reste inférieure à 0,4 environ. Pour des scintillations plus fortes, l'influence de la fréquence est moins prononcée et S_4, à de rares exceptions près, atteint une valeur maximale voisine de l'unité. Cela concorde bien avec les prévisions théoriques, compte tenu de l'effet de saturation dû à la diffusion multiple [Yeh et autres, 1975; Umeki et autres, 1977b]. Les mêmes observations ont montré que l'indice de scintillation de phase σ_Φ (défini comme égal à l'écart type de la phase dans la gamme des spectres de fluctuation contenant les scintillations d'intensité) varie comme f^{-1}; ce résultat a été également obtenu par Crane [1976].

Les données de scintillation d'amplitude sur plusieurs fréquences à environ 1,5 et 3,9 GHz recueillies à l'île de l'Ascension, en région équatoriale [Franke et autres, 1984], indiquent une influence de la fréquence comprise entre $f^{-1,6}$ et $f^{-1,9}$, et de $f^{-1,7}$ en moyenne. On estime que ces valeurs sont liées à un spectre d'irrégularité en loi de puissance à deux composantes, enregistré lors des observations *in situ* et par radar de la région F pendant la nuit [Basu et autres, 1980].

Des mesures effectuées pendant deux mois – de la fin avril à la fin juin 1978 – au centre de Kashima (coordonnées géographiques 35°57′ N, 140°40′ E; latitude géomagnétique 25°37′ N) avec les balises du satellite géostationnaire ETS-II montrent que l'influence de la fréquence sur les indices de scintillation S_4 est, entre 136 MHz et 1,7 GHz, en moyenne de $f^{-1,4}$ pendant la nuit et de $f^{-1,5}$ pendant le jour. Pendant la nuit, l'influence de la fréquence varie avec le temps, conformément à la variation temporelle de la structure des irrégularités de la densité électronique après le coucher du Soleil à l'altitude de la couche F [Fujita et autres, 1982].

Dans la gamme des GHz, des observations de signaux émis par des satellites géostationnaires japonais sur les fréquences 1,7 GHz, 4 GHz et 11,5 GHz ont montré que leur amplitude variait comme f^{-1} lorsque f est comprise entre 1,7 et 4 GHz et comme f^{-2} lorsque f est comprise entre 4 et 11,5 GHz. Ces observations ont eu lieu lors d'un orage géomagnétique accompagné de fortes scintillations le 15 février 1978. A ce moment-là, l'indice S_4 à la fréquence 136 MHz était supérieur à l'unité, ce qui indique une focalisation [Ogawa et autres, 1980].

2.3 *Considérations géométriques*

L'intensité avec laquelle les scintillations sont perçues dépend de la position de l'observateur par rapport aux irrégularités de l'ionosphère qui en sont la cause. Pour une valeur constante de l'épaisseur de la région d'irrégularité ainsi que de ΔN, écart que présente la densité électronique dans cette région, on doit prendre en considération certains facteurs géométriques pour évaluer les données et pour prévoir les effets de scintillation en un lieu donné. Parmi ces facteurs, nous citerons:

2.3.1 L'angle zénithal de la trajectoire à l'altitude de la couche ionosphérique. Wand et Evans [1975] ont trouvé que l'intensité des scintillations est approximativement fonction de la sécante de l'angle zénithal du trajet tant que cet angle est supérieur à 70°; aux angles de site inférieurs, il convient d'utiliser une relation angulaire faisant intervenir une puissance de l'angle zénithal comprise entre 0,5 et 1.

2.3.2 L'angle du trajet de propagation avec le champ magnétique terrestre. Pour évaluer la scintillation, on doit se fonder sur deux modèles, l'un de la configuration des irrégularités, l'autre d'une loi gaussienne ou d'une loi de puissance pour le spectre de ces irrégularités. Aux latitudes aurorales, les irrégularités sont étirées le long du champ magnétique terrestre sous forme de feuillets [Rino, 1978]. Aux latitudes équatoriales, l'allongement peut être de l'ordre de 50 à 100 [Koster, 1963]. A des latitudes moyennes, des mesures effectuées à 136 MHz, pendant l'été 1981, ont suggéré que des irrégularités à 300 km d'altitude, qui sont responsables des scintillations en ondes métriques et décimétriques, sont étirées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre avec un allongement de 10 [Sinno et Minakoshi, 1983]. Le niveau de scintillation augmente considérablement lorsque la direction de propagation dans l'ionosphère est voisine de celle du champ magnétique terrestre.

2.3.3 La distance de la région d'irrégularités à la source ainsi qu'à l'observateur; au voisinage des irrégularités, il ne se produit que des fluctuations de phase. Comme on l'a noté [Mikkelsen et autres, 1978; Crane, 1977], l'indice de scintillation théorique peut s'exprimer en fonction des facteurs ci-dessus lorsqu'il s'agit d'irrégularités représentées par un spectre à loi de puissance; des travaux analogues ont été entrepris par Singleton [1970] dans le cas où le spectre de puissance des irrégularités est gaussien.

2.4 *Morphologie*

Les variations de la scintillation peuvent être divisées en composantes qui dépendent de la latitude géomagnétique, de la longitude et de l'heure locale. Aarons [1982] a présenté une synthèse de la morphologie de ce phénomène. Un résumé des caractéristiques de la scintillation est donné dans le Tableau I.

La scintillation ionosphérique équatoriale est essentiellement un phénomène de nuit; c'est avant minuit qu'elle est le plus prononcée. Ce phénomène atteint sa plus grande intensité au voisinage des équinoxes dans les régions de l'Amérique du Sud et de l'Afrique, mais sa variation saisonnière aux autres longitudes est encore mal établie. La scintillation équatoriale, dont la limite se situe entre 20° et 30° de latitude géomagnétique [Aarons et autres, 1971; Taur, 1973] présente une corrélation positive à long terme avec le nombre des taches solaires [Taur, 1974; Aarons, 1977]. L'influence du nombre des taches solaires est représentée sur la Fig. 1, d'après des données recueillies dans certaines stations terriennes d'INTELSAT au cours d'une période de 10 ans [Fang, 1980; Fang et Pontes, 1981].

Aux latitudes moyennes, on note des variations en fonction de l'heure du jour et de la latitude ainsi qu'avec la saison et l'activité solaire. Aux latitudes élevées, le phénomène de scintillation présente, en direction de l'équateur, une limite très nette dont la position dépend de l'heure de la journée et de l'activité magnétique. Du côté du pôle par rapport à cette limite, les scintillations sont maximales dans la zone des aurores.

La Fig. 2 [Aarons et autres, 1971] est une carte généralisée de l'hémisphère non éclairé, qui représente la profondeur des fluctuations en fonction de l'heure locale pour une année d'activité solaire relativement élevée. La profondeur des fluctuations est proportionnelle à la densité des teintes foncées sur la figure. Cette carte provient essentiellement de mesures faites à la fréquence 136 MHz.

2.4.1 *Scintillation équatoriale*

Des évanouissements ont été notés jusqu'à 6 GHz lors d'observations à long terme dans la région équatoriale [Taur, 1973; Skinner et autres, 1971]. La profondeur de la scintillation y est plus grande que dans les régions aurorales. L'occurrence de la scintillation équatoriale est en corrélation positive avec le flux solaire et tend à être en corrélation inverse avec l'activité magnétique [Koster, 1972; Mullen, 1973]. L'étendue de la région dans laquelle elle se manifeste, ainsi que son intensité, augmentent avec l'activité solaire. La scintillation la plus intense, au cours des années d'activité solaire élevée, se manifeste le soir après le coucher du Soleil dans la région comprise entre ± 20° de l'équateur magnétique où l'on observe de fortes densités électroniques [Aarons et autres, 1981; Aarons, 1982; Fang et Pontes, 1981; Fang et Liu, 1983].

Il convient de noter que la scintillation équatoriale est fortement influencée par la longitude [Basu et Khan, 1976]. La Fig. 3 [Aarons et autres, 1980] représente des diagrammes d'occurrence saisonnière pour deux régions de longitude différente (0 à 70° Ouest et 135 à 180° Est, Guam-Kwajalein dans ce dernier cas). Aux fréquences de l'ordre du GHz, il y a un maximum équinoxial très net, l'indice de scintillation des fréquences les plus basses étant souvent proche de l'unité.

A Koweït, de fortes scintillations à 4 GHz, dont l'amplitude dépassait 10 dB crête-à-crête et dont la durée dépassait 2 heures, ont été observées pendant le printemps 1980. On a constaté que le taux de fluctuation diminuait progressivement au cours d'une période d'observation. [Karasawa et Yasukawa, 1981].

Pour les applications aux communications internationales utilisant un satellite synchrone à 4 GHz, on peut évaluer l'effet cumulatif des scintillations ionosphériques au moyen de la Fig. 4 [Fang et Pontes, 1981].

TABLEAU I – *Influence des facteurs solaires, géophysiques et temporels sur la scintillation ionosphérique*

Paramétre	Latitudes équatoriales	Latitudes moyennes	Latitudes aurorales	Latitudes polaires
Activité de la scintillation	Varie entre des valeurs extrêmes très éloignées	En général, très calme à modérée	En général, modérée à très forte	Grande intensité les années de forte activité solaire
Variations diurnes	Maximum de nuit Minimum de jour	Maximum de nuit Sporadique de jour	Maximum de nuit Maximum de jour (pas à l'intérieur de la calotte polaire	Maximum de nuit
Variations saisonnières	Influence de la longitude Crêtes aux équinoxes Accra (Ghana) Maximum en novembre et mars Minimum aux solstices Huancayo (Pérou) Maximum d'octobre à mars Minimum de mai à juillet Iles Kwajalein Maximum en mai Minimum en novembre et décembre	Maximum au printemps Minimum en hiver Tokyo (Japon) Maximum en été Minimum en hiver	Fonction du secteur de longitude	Maximum en hiver
Variations en fonction de l'activité solaire	L'occurence et l'intensité de la scintillation augmentent fortement avec le nombre des taches solaires	Données non concluantes	L'occurence et l'intensité de la scintillation augmentent fortement avec le nombre des taches solaires	L'occurence et l'intensité de la scintillation augmentent fortement avec le nombre des taches solaires
Variations en fonction de l'activité magnétique	Influence de la longitude Accra (Ghana) L'occurence de la scintillation diminue avec K_p Huancayo (Pérou) Equinoxe de mars L'occurence diminue avec K_p Solstice de juin L'occurence augmente avec K_p Equinoxe de septembre 00 h 00-04 h 00 (heure locale) L'occurence augmente avec K_p	Ne dépend pas de K_p	L'occurence de la scintillation augmente avec K_p	L'occurence de la scintillation augmente avec K_p

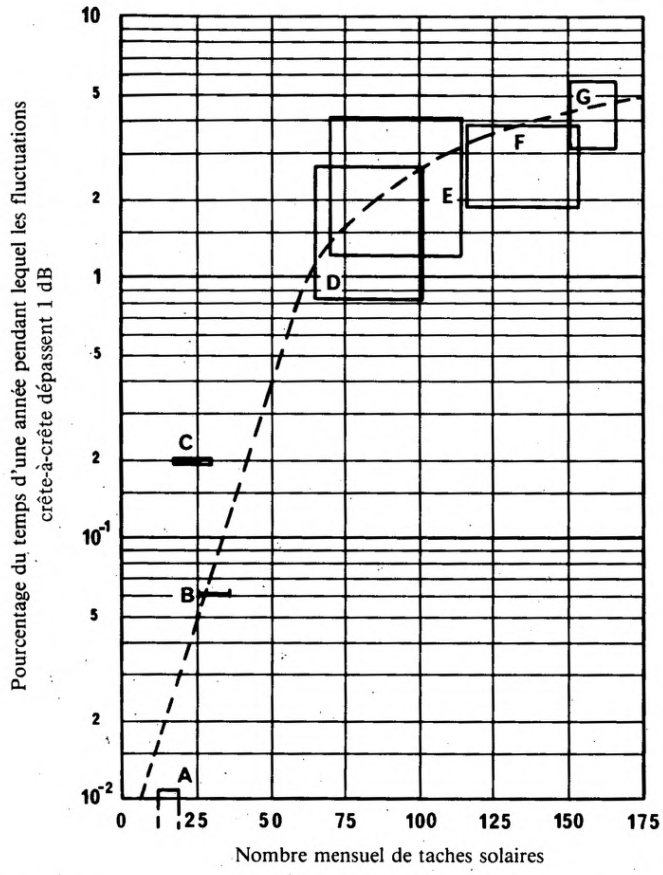


FIGURE 1 – *Influence de la moyenne mensuelle du nombre relatif international de taches solaires sur la scintillation ionosphérique équatoriale à 4 GHz [Fang, 1980; Fang et Pontes, 1981]*

Les segments horizontaux et les rectangles font connaître le domaine des variations sur une année pour différentes porteuses.

A: 1975-1976, Hong-Kong et Bahrein, 15 porteuses
B: 1974, Longovilo, 1 porteuse
C: 1976-1977, Taipei, 2 porteuses
D: 1970-1971, 12 stations, plus de 50 porteuses
E: 1977-1978, Hong-Kong, 12 porteuses
F: 1978-1979, Hong-Kong, 10 porteuses
G: 1979-1980, Hong-Kong, 6 porteuses

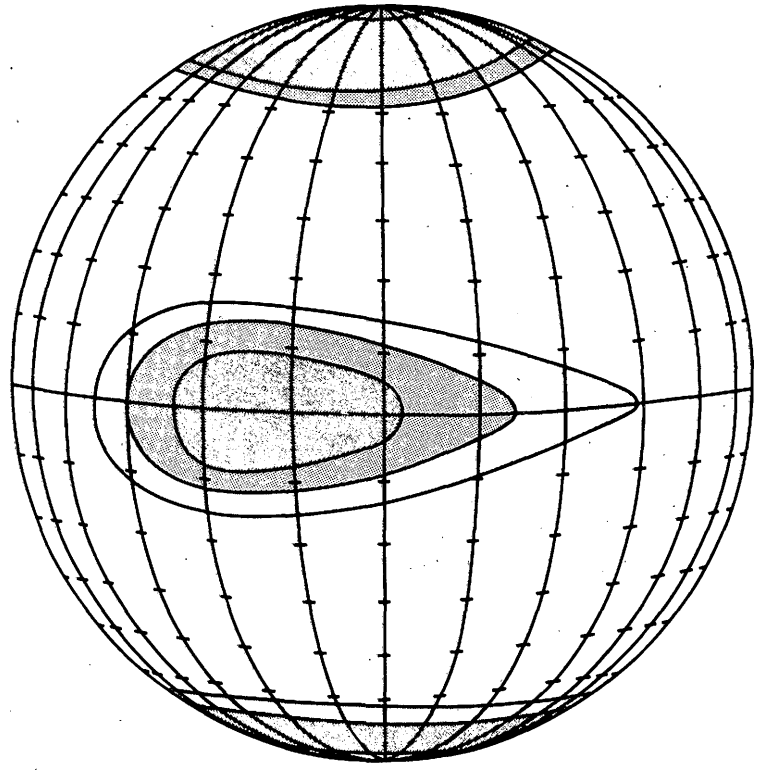


FIGURE 2 – *Occurrence des scintillations sur l'hémisphère non éclairé de la Terre. La densité des hachures est proportionnelle à l'occurrence des évanouissements profonds*

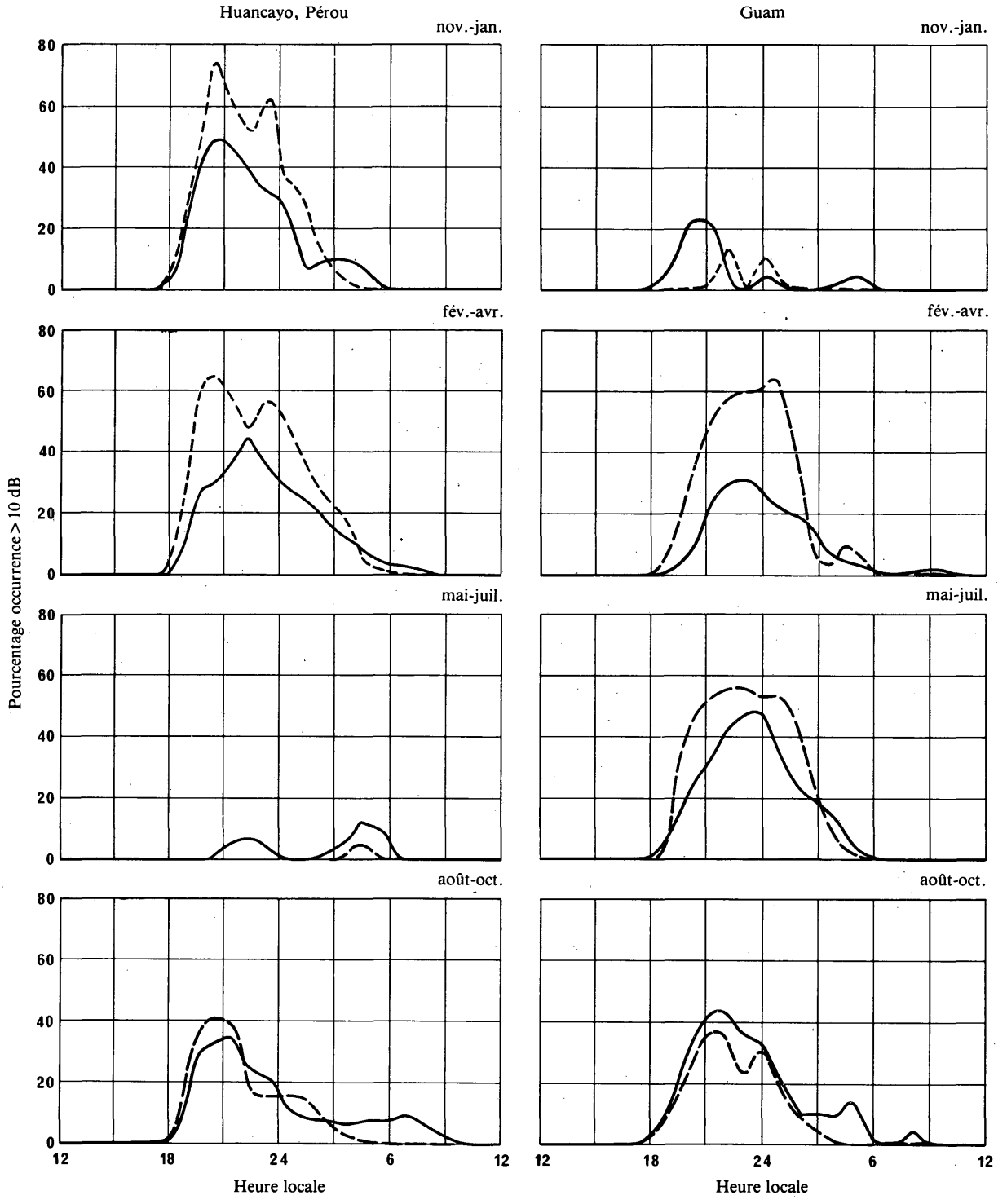


FIGURE 3 – *Occurrence saisonnière des scintillations pour deux zones de longitude différente au voisinage de l'équateur*

– – – $K_p = 0 - 1^+$

——— $K_p = 3^+ - 9$

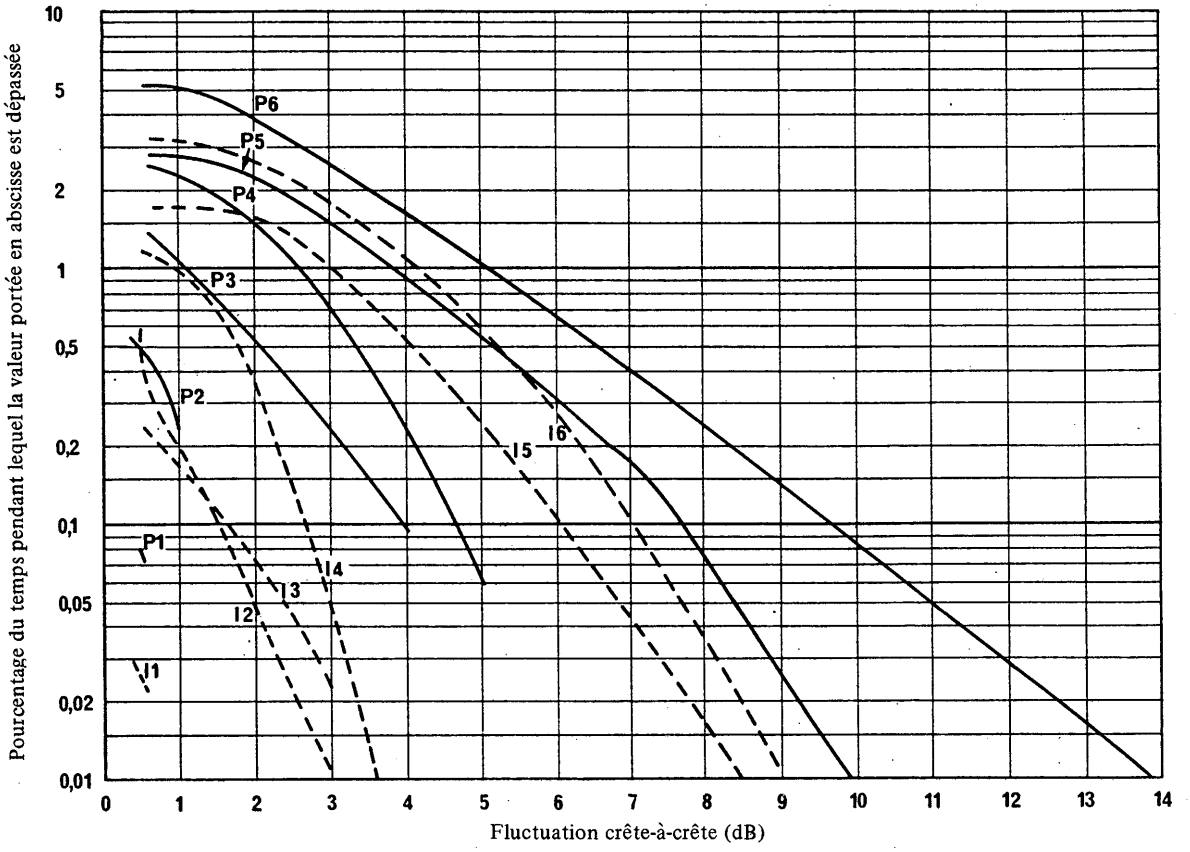


FIGURE 4 – *Statistique annuelle de la fluctuation ionosphérique sur 4 GHz observée à la station terrienne de Hongkong (courbes I1, P1, I3-I6, P3-P6) et à la station terrienne de Taipei (courbes P2 et I2)*

Les courbes P se rapportent à un angle de site de 20° en direction d'un satellite synchrone situé vers l'Est; les courbes I se rapportent à un angle de site de 30° en direction d'un satellite synchrone situé vers l'Ouest [Fang et Pontes, 1981]

Courbe	Période	Nombre de taches solaires
I1 P1	Mars 75-76	10-15
I2 P2	Juin 76-77	12-26
I3 P3	Mars 77-78	20-70
I4 P4	Oct. 77-78	45-110
I5 P5	Nov. 78-79	110-160
I6 P6	Juin 79-80	153-165

2.4.2 *Scintillation aux latitudes moyennes*

La variation diurne de la scintillation aux latitudes moyennes présente un maximum très net au voisinage de minuit, qui est lié à l'apparition du phénomène F-diffus. Dans certaines séries d'observations, on a également observé un second maximum au voisinage de midi. Ce dernier est particulièrement prononcé en été et l'on a des raisons de penser qu'il est associé à l'ionisation E sporadique [Aarons et Whitney, 1968; Cornec, 1978]. Des données recueillies pendant des périodes d'activité magnétique calme ou au contraire perturbée montrent qu'il n'y a guère de corrélation entre la scintillation aux latitudes moyennes et l'activité magnétique [Bramley, 1974; Wand et Evans, 1975; Aarons et Martin, 1975].

Des observations faites à Tokyo et autour de cette ville (latitude invariante du trajet de propagation au maximum de la couche F2 = 26°) font apparaître un maximum marqué en été et un minimum en hiver (Tableau I). Le pourcentage d'occurrence de scintillations en été, aux équinoxes et en hiver, est indiqué dans le Tableau IIa pour des signaux à 136 MHz du satellite ETS-II [Fujita et autres, 1978; Sinno et Kan, 1980]. De fortes scintillations ionosphériques ont été observées au Japon pour les signaux en hyperfréquence de satellites géostationnaires. En particulier, au cours de l'orage géomagnétique du 22 mars 1979, les scintillations observées atteignaient 10 dB crête-à-crête sur 4 GHz et 3,5 dB crête-à-crête sur 12 GHz [Ogawa et autres, 1980; Minakoshi et autres, 1981].

Aux latitudes moyennes, les indices de scintillation sont faibles, ce qui n'empêche pas que des valeurs élevées soient signalées de temps en temps. Le Tableau IIb contient des statistiques fondées sur l'enregistrement, à Hamilton (Massachussets, Etats-Unis d'Amérique), de signaux émis sur la fréquence 137 MHz par le satellite ATS-3 (latitude invariante d'intersection du trajet de propagation avec le maximum de la couche F2 = 53°).

2.4.3 *Scintillation aux latitudes élevées*

La scintillation aux latitudes élevées présente de plus grandes variations d'une année à l'autre du fait de l'activité solaire, que celles observées dans la région équatoriale. Les effets ne sont pas les mêmes dans les régions aurorales et dans les régions polaires. La scintillation augmente considérablement lorsque le trajet du rayon traverse des régions de latitudes élevées. L'augmentation se manifeste dès que l'on franchit la frontière des irrégularités de faible niveau située, la nuit, dans la même région que le creux de l'ionosphère [Houminer et autres, 1981]. Les scintillations sont maximales au-dessus de la région des aurores [Fremouw et Rino, 1973]. Pendant les périodes d'activité magnétique, les niveaux de scintillation aurorale augmentent de façon spectaculaire avec les excursions locales du champ magnétique. Du point de vue statistique, ils augmentent avec l'indice magnétique planétaire K_p [Basu, 1975; Basu et Aarons, 1980] (pour la définition de K_p, voir [Davies, 1965]).

Des observations de satellites géostationnaires faites à Ottawa, station voisine de la frontière nocturne des scintillations, ont révélé, à la fréquence 230 MHz, des évanouissements crête-à-crête de plus de 2 dB pendant moins de 1% du temps et de plus de 10 dB pendant moins de 0,1% du temps [Maynard, 1972a et b].

D'autres études des marges contre les évanouissements ionosphériques faites à Ottawa et à Ft. Churchill (Canada) sur des satellites géostationnaires ont montré que ces marges dépendent non seulement de la fiabilité exigée du système, mais encore de la fréquence de fonctionnement et de la latitude géomagnétique [Maynard, 1976; Ponnappa, 1973]. Les mesures effectuées sur les satellites LES-6 et ATS-5 ont montré que, pour une fiabilité de la propagation de 99,9%, il fallait à Ottawa une marge de 1,5 à 3 dB sur la fréquence 254 MHz alors qu'une marge de 8 à 14 dB était nécessaire à Churchill. La fréquence passant de 254 à 1500 MHz, les valeurs précédentes deviennent: de 0,2 à 0,3 dB à Ottawa et de 0,35 à 0,8 dB à Churchill.

Aux latitudes polaires, la scintillation est élevée pendant les années de forte activité solaire, surtout pendant les mois d'obscurité. Pendant les mois d'ensoleillement, son niveau diminue dans les années d'activité solaire maximale. Les scintillations polaires, au-dessus de 82° de latitude géomagnétique corrigée, sont dues à des arcs polaires qui traversent la région; on a observé des niveaux de plus de 28 dB crête-à-crête pendant plusieurs heures à la fréquence 250 MHz [Aarons et autres, 1981]. Le phénomène de scintillation polaire n'augmente que faiblement en période d'activité magnétique intense.

Les Tableaux IIb et IIc donnent le pourcentage d'occurrence des scintillations en certaines stations de latitude élevée.

TABLEAU IIa — *Scintillation au moins égale à 10 dB crête-à-crête, fréquence 136 MHz, latitude moyenne*

Lieu	Saison	Jour (06 h 00-18 h 00 HL)	Nuit (18 h 00-06 h 00 HL)
Tokyo (Japon) (Latitude invariante 26°)	Eté Equinoxe Hiver	0,7 0,1 0,0	10,5 0,7 0,4

TABLEAU IIb — *Scintillation au moins égale à 12 dB crête-à-crête, fréquence 137 MHz, latitudes subaurorales et aurorales*

Lieu	K_p	Jour (05 h 00-17 h 00 HL)	Nuit (17 h 00-05 h 00 HL)
Hamilton (Massachusetts)	0 à 3+ > 3+	0 0,1	1,4 2
Goose Bay (Labrador)	0 à 3+ > 3+	0,1 1,6	1,8 6,8
Narssarssuaq (Groenland)	0 à 3+ > 3+	2,9 19	18 45

TABLEAU IIc — *Scintillation au moins égale à 10 dB crête-à-crête, fréquence 254 MHz, latitudes aurorales*

Lieu	K_p	Jour (06 h 00-18 h 00 HL)	Nuit (18 h 00-06 h 00 HL)
Goose Bay (Labrador)	0 à 3+ > 3+	0,1 0,3	0,1 1,2
Narssarssuaq (Groenland)	0 à 3+ > 3+	0,1 2,6	0,9 8,4

HL : heure locale.

2.5 *Caractéristiques du signal*

2.5.1 *Paramètres statistiques du signal*

L'intensité de la scintillation peut être caractérisée par la variance de la puissance reçue ou par celle de son logarithme. L'indice σ_χ est l'écart type de la variance du logarithme de la puissance reçue [Tatarski, 1967]. Pendant les périodes de scintillation pour lesquelles l'un ou l'autre de ces indices a une valeur constante, les fluctuations de l'intensité de champ des signaux peuvent être exprimées par une fonction empirique de densité de probabilité (fonction edp). De telles fonctions empiriques sont représentées graphiquement dans la Fig. 5, pour plusieurs valeurs de S_4. La phase du signal reçu peut aussi varier. Des fonctions empiriques de densité de probabilité pour les fluctuations de phase sont données dans la Fig. 6, pour les mêmes cas que ceux de la Fig. 5. Les données représentées dans les Fig. 5 et 6 ont été obtenues en une station de latitude moyenne, à 150 MHz [Crane, 1974].

On a essayé d'établir des modèles de la fonction edp d'amplitude observée. Whitney et autres [1972] ont construit des modèles de fonctions de distribution fondés sur la distribution en m, ($m = (S_4)^{-2}$) de Nakagami et ils ont montré que les modèles donnent une approximation raisonnable par rapport à leurs fonctions de distribution empiriques observées. Whitney et autres [1972] ainsi que Rino et Fremouw [1973] ont montré que la distribution log-normale ne constitue pas un bon modèle de la scintillation ionosphérique. Crane [1974] a montré que le modèle de distribution en m de Nakagami permettait d'obtenir une approximation raisonnable à utiliser pour établir une relation entre S_4 et σ_χ et pour interpréter les nombreuses séries d'observations communiquées. De même, la fonction edp selon Rayleigh fournissait des résultats bien adaptés aux données d'observation, dans les conditions correspondant à des scintillations très intenses ($S_4 > 0{,}9$). Les relations qui existent entre les mesures de scintillation le plus communément utilisées ont été déduites en supposant que la fonction edp d'amplitude est une distribution en m de Nakagami [Bischoff et Chytil, 1969; Chytil, 1967]. Nakagami [Hoffman, 1960] a établi la relation entre la distribution en m de Nakagami et la fonction de distribution de Nakagami-Rice donnée dans le Rapport 266. Pour $m = 1$ (scintillations fortes), la distribution en m de Nakagami est une distribution de Rayleigh, et pour $m \gg 1$ (scintillations faibles), c'est une distribution log-normale.

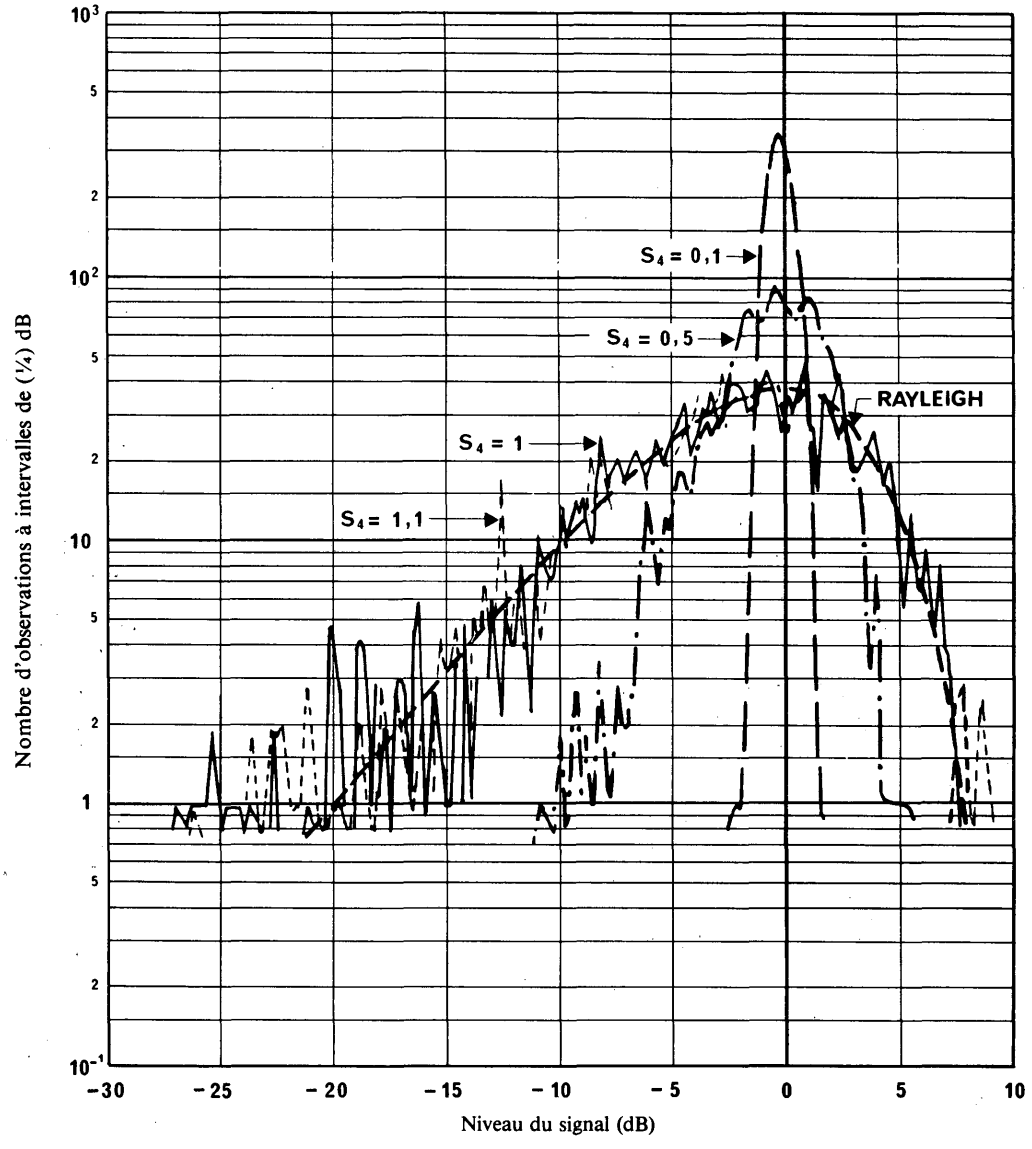


FIGURE 5 - *Fonctions empiriques de densité de probabilité d'amplitude*

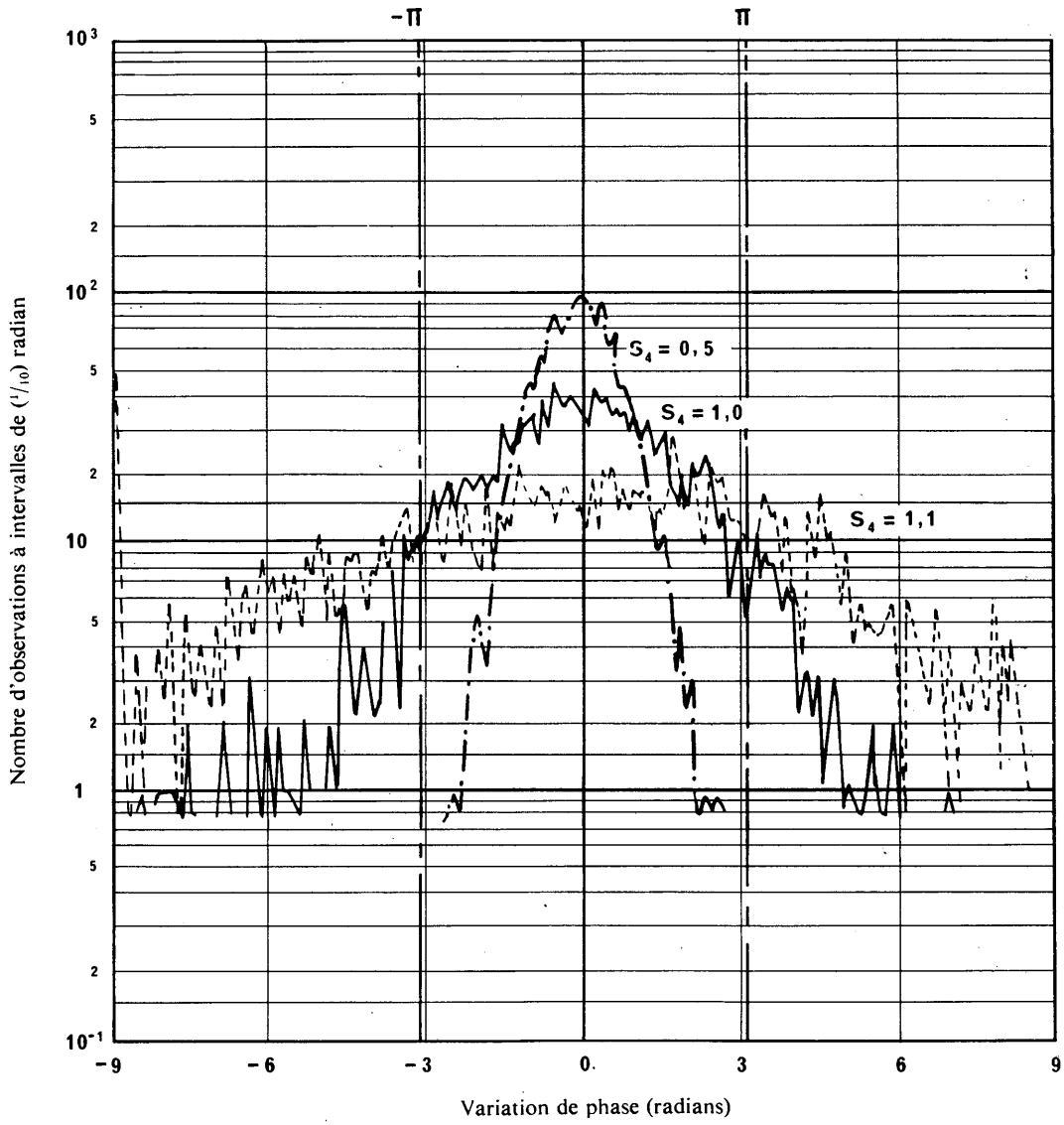


FIGURE 6 – *Fonctions empiriques de densité de probabilité de phase*

Les distributions log-normale et en *m* de Nakagami sont toutes les deux caractérisées par un seul paramètre qui peut être lié à S_4 soit à σ_χ. Il existe des modèles plus compliqués comportant un plus grand nombre de paramètres qui peuvent être ajustés pour s'adapter aux données. Un modèle représentatif de cette classe est le modèle complexe de statistique gaussienne [Rino et Fremouw, 1973]. Les composantes active et réactive du signal reçu sont représentées dans le modèle comme des distributions gaussiennes à moyenne nulle, conjointement dépendantes, procurant trois paramètres à utiliser pour l'adaptation des fonctions edp, à savoir les variances pour les deux composantes et la corrélation entre celles-ci. Dans le cas de fortes scintillations, les variances pour les deux composantes sont égales et la corrélation entre celles-ci est égale à zéro (loi de Rayleigh). On a constaté qu'un modèle plus simple, fondé sur la distribution de Nakagami pour l'intensité et sur la distribution normale pour la phase, est au moins aussi bon qu'un modèle à deux composantes [Fremouw et autres, 1980].

2.5.2 *Spectre des fluctuations en amplitude et en phase*

Les fluctuations des signaux peuvent aussi être décrites au moyen de spectres de puissance dans l'espace ou dans le temps [Rufenach, 1972]. Des estimations temporelles de la densité spectrale de puissance pour des scintillations observées à 150 et 400 MHz ont été faites par Crane [1975] et comparées avec un modèle théorique de la scintillation ionosphérique fondé sur un spectre des irrégularités en loi de puissance donnant de faibles scintillations. La comparaison montre que les spectres des fluctuations d'amplitude logarithmique atteignent un maximum pour une fréquence voisine de $f = 0{,}4\ v/r_0$; v est la vitesse relative des irrégularités normale à la direction de la visibilité directe (vitesse de dérive), à l'emplacement du maximum des fluctuations de la densité électronique, et r_0 est le rayon de la première zone de Fresnel au même emplacement ($r_0 = (\lambda Z)^{1/2}$, avec λ = longueur d'onde et $Z = \rho(L - \rho)/L$ où L = longueur du trajet et ρ = distance à laquelle se trouvent les irrégularités). Le spectre de puissance pour les fluctuations d'amplitude logarithmique décroît lorsque la fréquence augmente comme f^{-3} (asymptote de haute fréquence). Les données ont cette forme jusqu'à ce qu'elles soient masquées par des bruits de modulation. La Fig. 7 représente un certain nombre de spectres de puissance obtenus pour des scintillations équatoriales sur des signaux à 4 GHz émis par le satellite géostationnaire Intelsat-IV [Fang et Pontes, 1981].

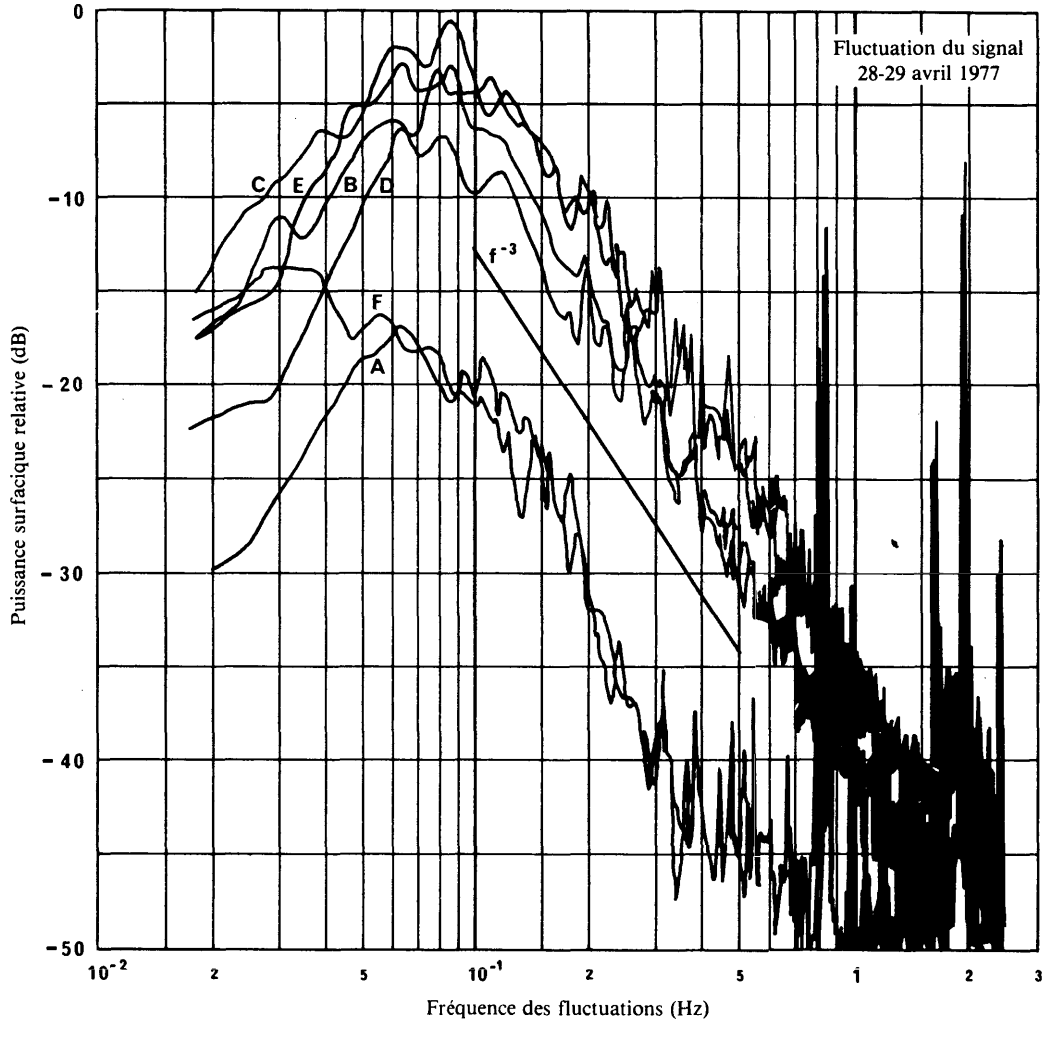


FIGURE 7 – *Estimations de la densité spectrale de puissance pour un satellite géostationnaire (Intelsat-IV) à 4 GHz*

La scintillation a été observée dans les soirées des 28 et 29 avril 1977 à la station terrienne de Taipei

A: 30 minutes avant le début de la scintillation
B: au début
C: 1 heure après
D: 2 heures après
E: 3 heures après
F: 4 heures après

Le spectre de puissance des fluctuations d'intensité pour une forte diffusion dans la région équatoriale a été mesuré au moyen des émissions du satellite ATS-6 sur 136 et 360 MHz [Whitney et Basu, 1977]. Dans le cas de forte diffusion, la fréquence de transition séparant les pentes de basse fréquence des pentes de haute fréquence, peut elle aussi augmenter, même comme f^{-4}. L'élévation de la fréquence de transition, souvent appelée «élargissement spectral», est due à la diffusion multiple [Umeki et autres, 1977a].

Deux fonctions sont étroitement liées aux spectres des scintillations et sont en rapport avec la réception en diversité: ce sont les fonctions de corrélation de l'amplitude et de la phase. Le temps de corrélation, défini comme la durée nécessaire pour que la corrélation diminue de son maximum à la moitié de ce maximum, présente un intérêt particulier. Lorsque la scintillation est faible, les dimensions de la première zone de Fresnel déterminent la distance de corrélation de la scintillation d'amplitude, laquelle est proportionnelle à l'intervalle de corrélation. Le temps de corrélation varie donc, dans ce cas, comme $f^{-1/2}$. Quand la scintillation augmente, la corrélation du signal disparaît du fait de la dispersion multiple. Pour un état donné de l'ionosphère, la scintillation devient plus forte lorsque la fréquence diminue et, finalement, la corrélation du signal disparaît, ce qui cause une diminution de l'intervalle de corrélation [Umeki et autres, 1977b]. L'intervalle de corrélation pour les scintillations de phase ne dépend pas sensiblement de la fréquence car c'est surtout des irrégularités de grandes dimensions que dépendent les principales contributions aux fluctuations de phase. La décorrélation peut cependant continuer à jouer un rôle tandis que la scintillation s'intensifie [Myers et autres, 1979].

2.5.3 *Méthodes de réception en diversité*

Par les méthodes de diversité, qui consistent à combiner deux signaux s'évanouissant indépendamment l'un de l'autre, on s'efforce de diminuer les effets des évanouissements qui se produisent pendant la scintillation. Pour un évanouissement de Rayleigh au-dessous du niveau médian, la profondeur est supérieure à 18,4 dB pendant 1% du temps. Pour deux évanouissements de Rayleigh indépendants, le plus fort des deux signaux en tout point de l'échantillon s'affaiblit au-dessous de 8,2 dB pour 1% du temps; d'où un gain de protection contre les évanouissements d'environ 10 dB. En général, le gain de diversité est fonction de la corrélation des deux échantillons. Si le coefficient de corrélation est inférieur à 0,6, le gain de diversité est d'au moins 8 dB. On peut prendre une valeur du coefficient de corrélation de 0,6 comme seuil pour une action satisfaisante, bien que ce gain de 8 dB ne s'applique strictement qu'à l'évanouissement de Rayleigh (forte scintillation). A la limite des faibles scintillations, un coefficient de corrélation entre des observations faites à deux fréquences pour des signaux se propageant par le même trajet ne sera inférieur à 0,6 que si le rapport entre les fréquences porteuses est supérieur à trois, ce qui permet en général de douter de l'efficacité de la diversité en fréquence pour compenser les effets de scintillations [Crane, 1977]. Les fluctuations simultanées agissant sur des ondes à polarisation orthogonale sont également en étroite corrélation pour les fréquences supérieures à 100 MHz [Koster, 1966; Whitney et Ring, 1971; Crane, 1977]. Il peut occasionnellement y avoir des exceptions dans les conditions de scintillation extrême. Des mesures du signal à 136 MHz émis par le satellite ETS-II [Sinno et Kan, 1978] ont montré que la corrélation entre les deux composantes à polarisation rectiligne se relâchait quand la scintillation s'accompagnait d'une rapide variation de la rotation de Faraday. Des observations [Fremouw et autres, 1980] de scintillations aux fréquences de l'ordre du gigahertz ont mis en évidence une corrélation réduite au travers de bandes relativement étroites sur les fréquences inférieures. On a notamment observé, entre 390 et 436 MHz, une décorrélation totale de phase et une décorrélation partielle d'intensité. Un examen visuel d'enregistrements en ondes décimétriques sur des fréquences extrêmement rapprochées (11,5 MHz) a également révélé une décorrélation, mais aucune analyse quantitative n'a encore été faite.

Il existe deux méthodes de diversité praticables, tant pour les faibles scintillations que pour les fortes scintillations: la diversité dans le temps et la diversité dans l'espace. Etant donné deux stations, la diversité dans le temps consiste à transmettre le même message à deux instants suffisamment éloignés l'un de l'autre pour que le coefficient de corrélation soit inférieur à 0,6; dans le cas de la diversité dans l'espace le même message doit être détecté en deux points de réception répondant à la même condition. La fonction de corrélation peut se calculer d'après le spectre de puissance pour les fluctuations des signaux reçus. La séparation dans le temps correspondant à un coefficient de corrélation de 0,6, calculée pour les spectres décrits au § 2.5.2, est donnée par $\tau = 0{,}3\ r_0/v$. En diversité dans l'espace, la séparation pour un coefficient de corrélation de 0,6 est $l = 0{,}3\ r_0 z_2/(z_2 - z_1)$ pour une direction normale au trajet de visibilité directe ainsi qu'au champ, et $l = 0{,}3\ r_0 \alpha z_2/(z_2 - z_1)$ pour une direction normale au trajet de visibilité directe dans la direction du champ; α est le rapport axial des irrégularités. Dans le cas d'incidence oblique, il faut connaître la projection de ces distances sur le sol pour pouvoir évaluer la distance de diversité.

On ne doit normalement faire appel aux méthodes de diversité que pour combattre les effets des fortes scintillations; les faibles scintillations sont annulées par une valeur raisonnable de la marge contre les évanouissements. Dans la zone équatoriale, les mesures de la fonction de corrélation mutuelle dans l'espace dans les conditions de forte diffusion ont conduit, pour le coefficient de corrélation, à des valeurs

typiques de 0,6 pour une distance entre antennes de 300 m, et de 0,3 pour une distance de 1000 m [Paulson et Hopkins, 1977]. La vitesse de dérive correspondante des irrégularités était d'environ 50 m/s. On avait mesuré cette vitesse avec des lignes de base d'antennes est-ouest qui devaient être parallèles au vecteur vitesse de dérive attendu. Pour d'autres orientations des antennes, la décorrélation nécessaire ne serait obtenue qu'avec des lignes de base plus longues. En conséquence, la diversité dans l'espace ne semble pratique que pour les stations terriennes fixes.

3. Absorption

3.1 *Introduction*

Quand on ne dispose pas de renseignements concernant directement l'affaiblissement dû à l'absorption ionosphérique, on peut évaluer cet affaiblissement à partir des modèles disponibles en appliquant la relation $(\sec i)/f^2$, pour les fréquences supérieures à 30 MHz, i étant l'angle d'incidence sur l'ionosphère du trajet de propagation.

La limite inférieure de la partie utilisable du spectre radioélectrique est déterminée par la réflexion et l'absorption ionosphériques, lesquelles augmentent généralement quand la fréquence diminue [Davies, 1965]. Dans les régions équatoriales et tempérées, l'emploi de fréquences supérieures à 70 MHz permet la traversée de l'ionosphère sans absorption notable.

Aux variations saisonnières et undécennales généralement prévisibles de l'ionosphère, s'ajoutent des variations moins prévisibles dues à des changements à court terme de l'activité solaire. Ces variations à court terme sont les plus sensibles au voisinage des zones aurorales et au-dessus des calottes polaires; on doit en tenir compte lorsque l'on planifie un service pour ces régions.

Des événements se produisant dans la calotte polaire ou dans la zone aurorale peuvent entraîner une absorption renforcée; l'occurrence de ces événements est aléatoire, leur durée est variable et leurs effets dépendent des emplacements des stations terminales et de l'angle de site du trajet suivi. Il en résulte que, pour la conception efficace de systèmes, on doit tenir compte de ces phénomènes de façon statistique, en se rappelant que les ordres de grandeur de la durée des phénomènes d'absorption sont de quelques heures dans la zone aurorale et de quelques jours dans la calotte polaire.

Des phénomènes d'absorption ionosphérique dont la durée peut être de 30 min environ peuvent également être causés par des éruptions solaires, pour lesquelles l'effet est maximal lorsque le Soleil est au zénith. En ondes métriques, les effets sont faibles et décroissent rapidement à mesure que la fréquence augmente.

Des mesures effectuées aux latitudes moyennes indiquent que, sur un trajet transionosphérique sous incidence verticale, l'absorption à la fréquence 30 MHz, dans des conditions normales, est typiquement de 0,2 à 0,5 dB. Pendant une éruption solaire, l'absorption augmente tout en restant inférieure à 5 dB. Les § 3.2 et 3.3 traitent de l'absorption aurorale et de l'absorption dans la calotte polaire.

Il convient de noter qu'on peut mesurer l'absorption de signaux en ondes décamétriques sur un trajet transionosphérique en recevant directement au sol des signaux émis par un satellite-sondeur en contre-haut [Iida et autres, 1973; Iida et Yamaya, 1976].

3.2 *Absorption aurorale*

L'absorption aurorale est due à un accroissement de la concentration électronique dans les régions D et E produit par l'arrivée d'électrons énergétiques. On pense que ces électrons sont précipités de la «couche de plasma» pendant les sous-orages polaires, et des zones de particules piégées au dernier stade de ces sous-orages [Hartz, 1972]. On observe l'absorption sur une bande de 10 à 20° de latitude centrée au voisinage de la latitude d'occurrence maximale des aurores optiques. Elle se produit sous forme d'une série d'augmentations discrètes (renforcements) de l'absorption, chacune d'une durée relativement courte, à savoir de quelques minutes à quelques heures, sa durée moyenne étant d'environ 30 min, et présente généralement une structure irrégulière dans le temps [Bellchambers et autres, 1962; Hargreaves et Cowley, 1967]. Les renforcements nocturnes sont caractérisés par des fluctuations rapides de l'absorption pendant des périodes de quelques minutes; pendant les heures du matin, les augmentations sont plutôt rapides et régulières, puis l'absorption décline lentement.

La plupart des mesures de l'absorption aurorale ont été faites avec des riomètres fonctionnant sur des fréquences voisines de 30 MHz. Bien que les absorptions médianes sous incidence verticale atteignent le même ordre de grandeur qu'en été pendant les heures du jour sous des latitudes moyennes, ces mesures ont montré que la variabilité d'un jour à l'autre est bien plus grande, et aussi que l'absorption varie d'une façon complexe en fonction de la latitude, de l'heure, de l'activité solaire, de la longitude et de la saison. C'est en termes de coordonnées géomagnétiques que l'on décrit le mieux les variations. La variation en latitude est à peu près gaussienne [Hargreaves, 1966]. La zone d'absorption se déplace d'environ 3° vers l'équateur et augmente en largeur de 12° à 18° (à 10% du maximum) lorsque la moyenne glissante du nombre de taches solaires passe de 0 à 100. On a découvert deux maxima diurnes, le plus grand dans la matinée et le plus petit aux environs de minuit

[Holt et autres, 1961; Hartz et autres, 1963; Driatskiy, 1966]. L'intensité de l'absorption passe approximativement du simple au double entre le minimum et le maximum d'activité solaire [Hook, 1968]. Dans l'hémisphère nord, l'absorption est maximale dans le secteur Union Soviétique-Alaska [Agy, 1975]. On constate qu'en hiver les absorptions pendant la matinée sont le double de celles d'été [Basler, 1966]. Si l'on admet que l'absorption subie par des signaux en ondes métriques sous incidence oblique est proportionnelle à (sec i)/f^2, et si l'on utilise des équations empiriques adaptées aux données d'absorption mesurées avec des riomètres (voir le Supplément au Rapport 252), on trouve, pour les absorptions prévisibles à l'emplacement et pendant la période de l'absorption aurorale maximale, les valeurs indiquées au Tableau III. On donne dans ce tableau les absorptions dépassées pendant divers pourcentages du temps, à la fréquence 127 MHz et pour les angles de site de 20° et 5°.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle l'absorption aurorale en ondes métriques prend des valeurs notables seulement pendant un faible pourcentage du temps.

TABLEAU III – *Absorption aurorale sur 127 MHz, dB*

Pourcentage du temps	Angle de site	
	20°	5°
0,1	1,5	2,9
1	0,9	1,7
2	0,7	1,4
5	0,6	1,1
50	0,2	0,4

3.3 *Absorption dans la calotte polaire*

Aux latitudes géomagnétiques supérieures à 64°, l'affaiblissement peut être provoqué également par l'absorption dans la calotte polaire qui se produit en des occasions relativement rares [Bailey et Harrington, 1962]. Elle se manifeste sous forme de phénomènes discrets, bien que parfois imbriqués, qui sont presque toujours liés à des phénomènes solaires discrets. Cette absorption dure longtemps et est décelable au-dessus de la partie de la calotte polaire éclairée par le Soleil [Davies, 1965; Ortner et autres, 1962]. Elle se produit généralement lors du maximum d'activité solaire où l'on observe jusqu'à 10 à 12 de ces phénomènes au cours d'une année. Le phénomène peut durer quelques jours, ce qui le distingue de l'absorption aurorale, souvent très localisée et dont les variations durent quelques minutes. L'absorption est due au bombardement de la haute atmosphère par des protons solaires qui sont focalisés vers les régions polaires par le champ magnétique terrestre.

L'absorption est causée par l'ionisation qui se produit à des altitudes supérieures à 30 km environ. Comme des électrons et des molécules neutres entrent en collision avec une fréquence élevée aux altitudes comprises entre 30 et 90 km, cette ionisation supplémentaire entraîne un affaiblissement considérable, principalement dans la gamme des ondes décamétriques et aux fréquences inférieures de la gamme des ondes métriques.

Un trait remarquable du phénomène d'absorption dans la calotte polaire est sa réduction considérable pendant les heures d'obscurité, pour un taux de production d'électrons donné. La Fig. 8 est un modèle théorique de la variation diurne de l'absorption dans la calotte polaire consécutive à une grande éruption solaire, établi sur la base d'observations faites avec des riomètres, à diverses latitudes.

Le Tableau IV résulte d'une analyse des mesures de diffusion vers l'avant sur un trajet oblique et de données d'absorption obtenues par riomètres [Bailey, 1964]; il indique le nombre des phénomènes d'absorption dans la calotte polaire pendant la période 1952-1963 ayant abouti à une absorption supérieure à 2,5 dB sous incidence verticale à la fréquence 30 MHz. On y trouve également la durée moyenne des phénomènes d'absorption pour chaque année ainsi que la moyenne et le maximum des crêtes d'absorption sous incidence verticale à la fréquence 30 MHz.

La loi en (sec i)/f^2 permet d'extrapoler pour diverses fréquences et divers angles d'incidence l'absorption dans la calotte polaire observée sur la fréquence 30 MHz à incidence presque verticale. Cette loi en fonction de la fréquence ne vaut strictement que pour l'absorption à des hauteurs supérieures à celle où la pulsation de l'onde dépasse la fréquence de collision des électrons. Au cours des phénomènes d'absorption dans la calotte polaire, une partie de l'absorption se produit à des hauteurs inférieures, mais il est peu probable que ce soit une source d'erreurs importante.

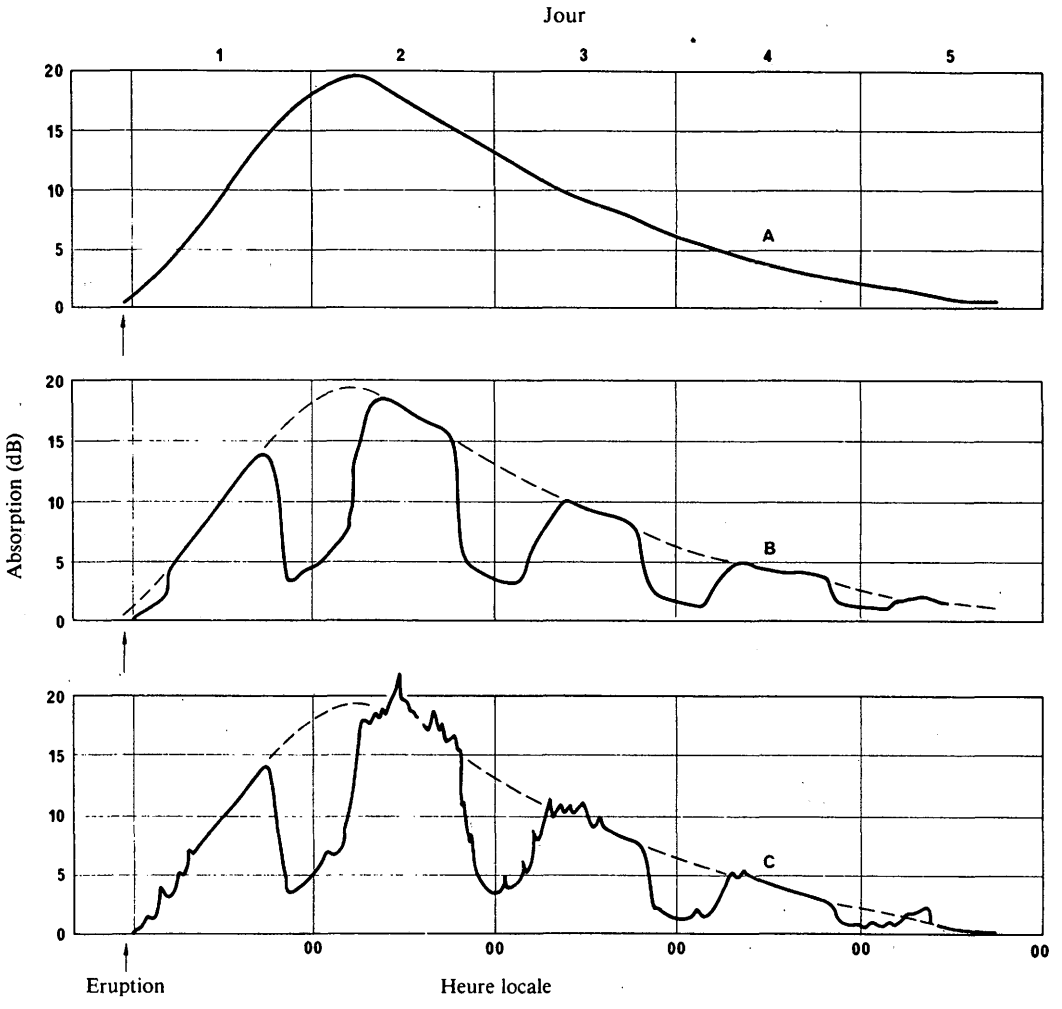


FIGURE 8 – *Modèle théorique d'absorption dans la calotte polaire consécutive à une grande éruption solaire, telle qu'on peut s'attendre à l'observer à l'aide de riomètres au voisinage de 30 MHz*

A: hautes latitudes (24 h de jour)
B: hautes latitudes (périodes égales de jour et de nuit)
C: zone aurorale

TABLEAU IV – *Phénomènes d'absorption dans la calotte polaire*

Année	1952-1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963
Moyenne glissante du nombre de taches solaires de Zurich	6 à 38	142	190	188	160	114	55	38	28
Nombre de phénomènes d'absorption	0	4	13	9	5	12	3	0	2
Durée moyenne (heures)	-	104	60	76	149	54	69	-	72
Moyenne des crêtes d'absorption (dB)	-	7	5	10	18	7	9	-	4
Maximum des crêtes d'absorption (dB)	-	13	9	24	24	20	17	-	5

Pour les événements enregistrés par les stations où le rapport jour/nuit est voisin de l'unité, l'absorption (mesurée en décibels) décroît généralement pendant le deuxième jour de l'événement jusqu'à la moitié environ de la valeur maximale du premier jour; le troisième jour, on observe encore une diminution de 50%. Le Tableau V est établi sur la base de ce modèle, en supposant un jour de 12 heures. La durée du jour à l'intérieur de la calotte polaire peut varier considérablement avec la latitude et la saison.

TABLEAU V – *Nombre d'heures d'absorption dans la calotte polaire aux différents niveaux (1952-1963 inclusivement)*

Absorption (dB) 127 MHz (angle de site: 10°)	Nombre d'heures
7-8	36
6-7	48
5-6	24
4-5	12
3-4	144
2-3	96
1-2	480

4. Effets dépendant du contenu électronique total

4.1 *Introduction*

Il existe un paramètre de la distribution de l'ionisation qui, à lui seul, présente un grand intérêt dans la détermination des effets de l'ionosphère sur les systèmes de radiocommunication et de radionavigation: c'est l'intégrale $\int n_e \, ds$, que l'on appelle encore «contenu électronique total» (en abrégé: CET) le long du trajet du rayon qui relie l'émetteur au récepteur. Certains des effets ionosphériques, comme la réfraction, la dispersion et le temps de propagation de groupe, sont proportionnels au CET; la rotation de Faraday lui est, elle aussi, sensiblement proportionnelle, l'effet des contributions de différentes portions du trajet étant pondéré par la composante longitudinale du champ magnétique. Une connaissance du CET permet donc de faire une estimation quantitative de nombreux et importants effets de l'ionosphère. Lorsque l'on parle du «CET» sans autre précision, on désigne le contenu en électrons d'une colonne verticale de section droite égale à l'unité, alors que, dans les applications pratiques, c'est généralement du contenu le long d'un trajet oblique que l'on a besoin; par conséquent, dans tout cas d'espèce, il importe de bien préciser s'il s'agit de valeurs du CET dans une colonne verticale ou oblique. On trouvera d'autres renseignements sur le CET dans le Rapport 725.

4.2 *Temps de propagation de groupe des ondes radioélectriques*

Lorsqu'une onde radioélectrique se propage entre une station terrienne et un satellite, la présence d'électrons libres le long du trajet de transmission ralentit la progression de cette onde de manière qu'elle se déplace à une vitesse de groupe inférieure à celle de la lumière dans le vide, d'où une augmentation du temps de propagation par rapport à celui auquel on s'attendait si l'onde se propageait en espace libre. Le retard subi par l'onde est communément appelé «temps de propagation de groupe» et il affecte la précision des systèmes de navigation par satellite. Pour une grande précision, le retard doit être compensé soit grâce à une méthode de prévision, soit par mesure directe. Cependant, dès que la précision exigée atteint des ordres de grandeur importants, par exemple 1 m sur une distance de 5000 km, ou 1 mm par seconde pour la mesure de la vitesse par effet Doppler, aucun modèle ne permet à ce jour d'atteindre de telles précisions [Papet-Lépine, 1978]. Le problème peut cependant être résolu en temps réel, si l'on tire profit de l'action dispersive de l'ionosphère en combinant les effets de l'ionosphère sur plusieurs fréquences judicieusement choisies.

La théorie magnéto-ionique, négligeant le champ magnétique terrestre et les collisions, montre que le temps de propagation de groupe d'une onde est en raison inverse du carré de sa fréquence et en raison directe de l'intégrale du nombre d'électrons le long du trajet. Cette relation s'exprime par:

$$\Delta\tau \approx \frac{1{,}33 \times 10^{-7}}{f^2} \int_s n_e\,(s)\ \mathrm{d}s = \frac{1{,}33 \times 10^{-7}}{f^2}\ N_s \qquad (1)$$

où $\Delta\tau$ est le temps de propagation de groupe dû à la présence d'électrons libres, en secondes, f la fréquence, en Hz et $\int_s n_e(s)\mathrm{d}s$ la densité électronique intégrée le long du trajet oblique (N_s) en électrons par m^2. La Fig. 9 représente graphiquement la variation de $\Delta\tau$ en fonction de f pour plusieurs valeurs du contenu électronique le long du trajet (N_s).

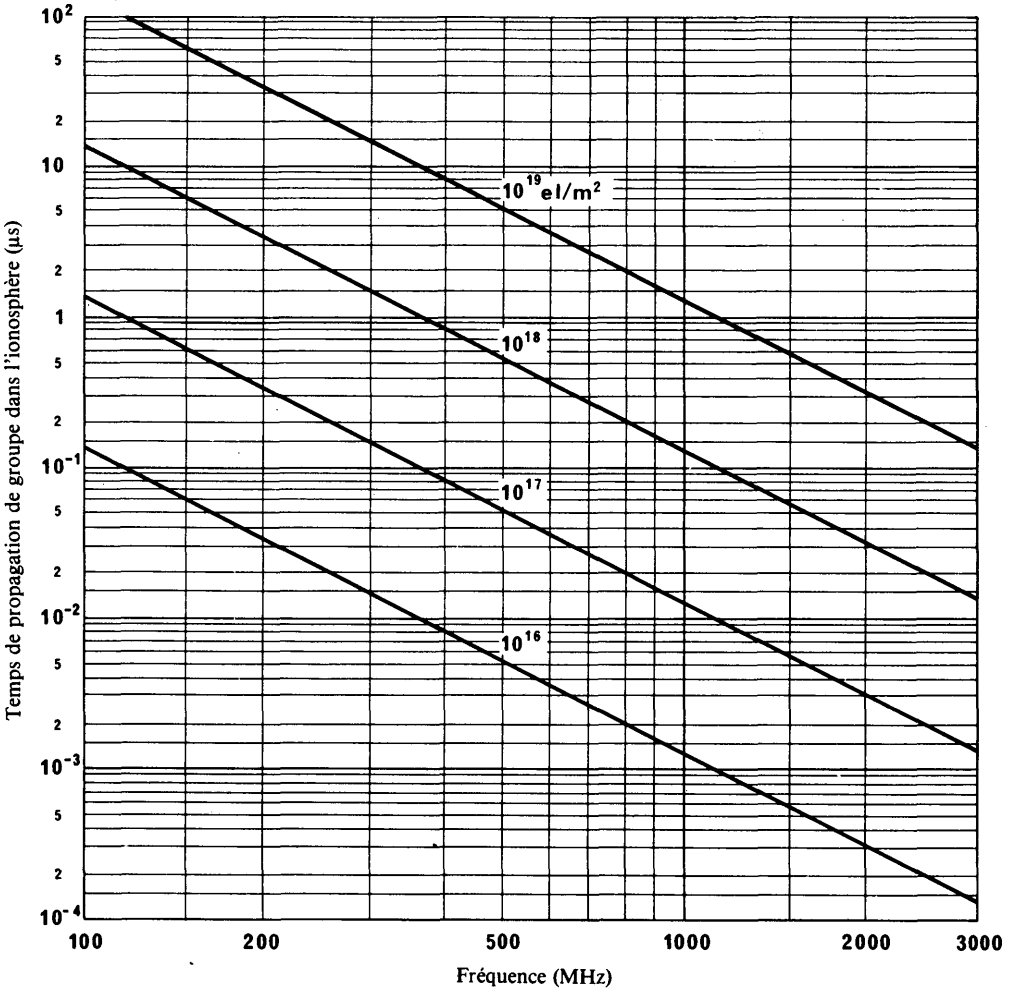


FIGURE 9 – *Temps de propagation de groupe dans l'ionosphère en fonction de la fréquence, pour diverses valeurs du contenu électronique*

Dans une bande de fréquences située autour de 1600 MHz, le temps de propagation de groupe varie entre environ 0,5 et 500 ns pour un CET compris entre 10^{16} et 10^{19} électrons par m^2. La Fig. 10 donne le pourcentage annuel d'heures diurnes pendant lequel le temps de propagation de groupe dépassera 20 ns au cours d'une période d'activité solaire relativement intense, valeur obtenue au moyen d'un modèle de CET élaboré par Bent et autres [1975].

Lorsque, dans les télécommunications par satellite, on recourt à la diversité de fréquence, il faut que l'on connaisse la différence des temps de propagation entre les deux voies. Une mesure de cette différence faite sur des liaisons dans les bandes des 11 et 4 GHz passant par le satellite japonais CS a montré qu'elle est de 1,16 ns pour un contenu électronique total N_s de 10^{17} électrons par m^2. Ce résultat concorde bien avec la valeur théorique déduite de l'application de la formule (1) [Kosaka et autres, 1979].

4.3 *Dispersion*

Lorsque des signaux transionosphériques occupent une large bande de fréquences, la variation du temps de propagation, qui est fonction de la fréquence, se traduit par une dispersion. Ce temps de propagation différentiel dans la largeur de bande est proportionnel à la densité électronique intégrée le long du trajet. Pour une largeur de bande fixe, la dispersion relative est inversement proportionnelle au cube de la fréquence. Il faut donc tenir compte de cet effet dans les systèmes à large bande fonctionnant en ondes métriques et éventuellement en ondes décimétriques. Exemple: pour un contenu électronique de 5×10^{17} électrons dans une colonne de 1 m^2, un signal avec une longueur d'impulsion de 1 µs aura un temps de propagation différentiel de 0,02 µs à 200 MHz, tandis que ce temps de propagation ne serait que de 0,00074 µs à 600 MHz (voir Fig. 11) [Millman, 1967]. Dans une émission d'impulsions, la dispersion ionosphérique donne lieu à une distorsion de l'amplitude du signal, de l'enveloppe, de la longueur des impulsions, de la modulation et de la phase [Millman et Olsen, 1980].

4.4 *Variation de fréquence*

Les effets de l'ionosphère sur la fréquence apparente d'un signal provenant d'un satellite ne sont que secondaires. En revanche, l'effet Doppler dispersif et les techniques de modulation de phase qui s'y rattachent constituent un outil très intéressant pour la mesure du contenu électronique de l'ionosphère et de l'exosphère [Alpert, 1963; Rawer, 1964].

Lors d'observations systématiques de l'effet Doppler à 48° N sur les fréquences 20 et 40 MHz, on a relevé de nombreuses influences ionosphériques [Joint Satellite Studies Group, 1965]. La courbe qui représente l'effet Doppler en fonction du temps subit de sérieuses déformations dues à la réfraction, ce qui augmente sérieusement l'imprécision de la détermination du moment de passage au point le plus rapproché [Arendt et autres, 1965].

4.5 *Polarisation*

La qualité de fonctionnement des systèmes spatiaux peut être sérieusement affectée par le phénomène de rotation de Faraday dans l'ionosphère. Ce phénomène agit sur tous les systèmes de télécommunications spatiales à polarisation rectiligne en ondes métriques et peut aussi être important à des fréquences plus élevées, dans des systèmes à réutilisation de fréquences appliquant une polarisation rectiligne. Il peut constituer la base d'une méthode de mesure précise et sensible du contenu électronique total de l'ionosphère. La discrimination par polarisations croisées (XPD), exprimée en dB pour des antennes alignées, est liée à l'angle de rotation de Faraday (I), par la relation suivante:

$$XPD = -20 \log (\text{tg } I) \qquad (2)$$

Lorsqu'une onde à polarisation rectiligne traverse l'ionosphère, elle se divise en deux composantes indépendantes de polarisation elliptique et de sens de rotation opposés. Quand la fréquence augmente, la polarisation se rapproche de la polarisation circulaire. Les deux composantes progressant dans le milieu ionisé avec des vitesses de propagation différentes, leurs rapports de phase se modifient continuellement. A la sortie de l'ionosphère, elles se recombinent pour former une onde à polarisation rectiligne, dont le plan de polarisation a tourné par rapport à celui de l'onde incidente. Ce phénomène, communément appelé effet Faraday, est causé par l'interaction de l'onde électromagnétique et des électrons en présence du champ magnétique terrestre.

La rotation de Faraday est inversement proportionnelle au carré de la fréquence et proportionnelle à l'intégrale du produit de la densité électronique par la composante du champ magnétique terrestre le long du trajet de propagation (Rapport 725). Sa valeur médiane, pour une fréquence donnée, a un comportement journalier, saisonnier et undécennal très régulier, qui est prévisible. Cette composante régulière de la rotation de Faraday peut donc être compensée par un réglage «manuel» de l'angle d'inclinaison du plan de polarisation, à l'antenne de la station terrienne. Cependant, de grands écarts peuvent se produire par rapport à ce comportement régulier pour de faibles pourcentages du temps à la suite d'orages géomagnétiques et, dans une moindre mesure, de perturbations ionosphériques itinérantes à grande échelle. Ces écarts ne peuvent être prévus à l'avance. Des fluctuations intenses et rapides de la rotation de Faraday de signaux émis en ondes métriques ont été associées à des scintillations respectivement fortes et rapides en des emplacements situés au voisinage des crêtes de l'anomalie équatoriale [Lee et autres, 1982].

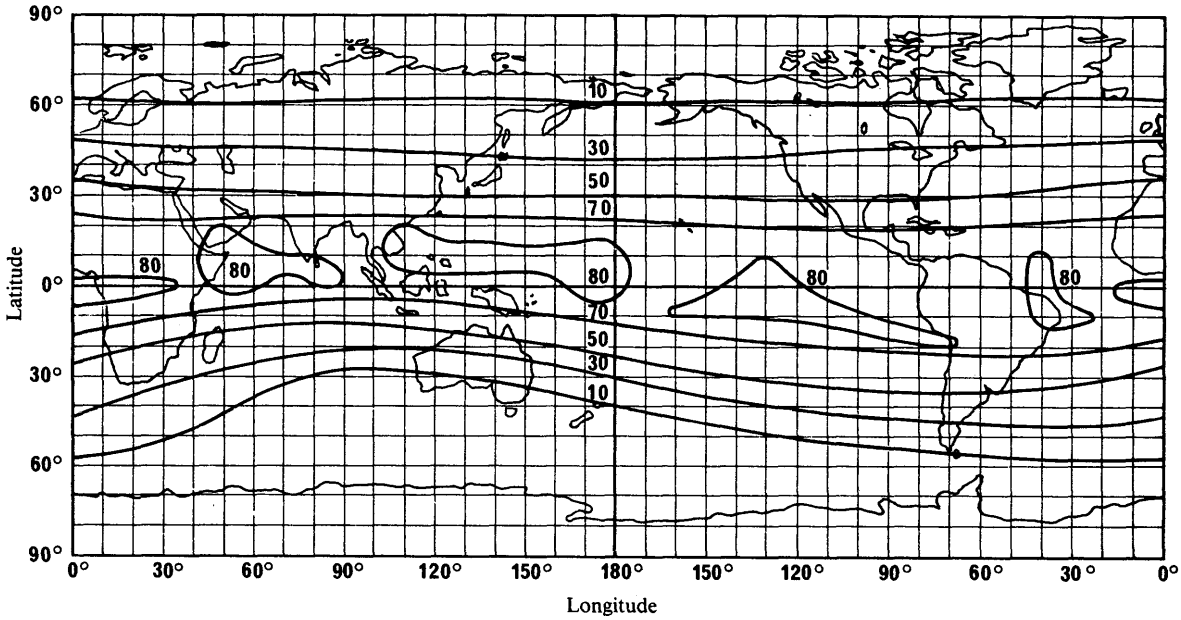


FIGURE 10 – *Contours du pourcentage du nombre annuel moyen des heures de jour au cours desquelles le temps de propagation à 1,6 GHz sous incidence verticale dépasse 20 ns (nombre taches solaires = 140)*

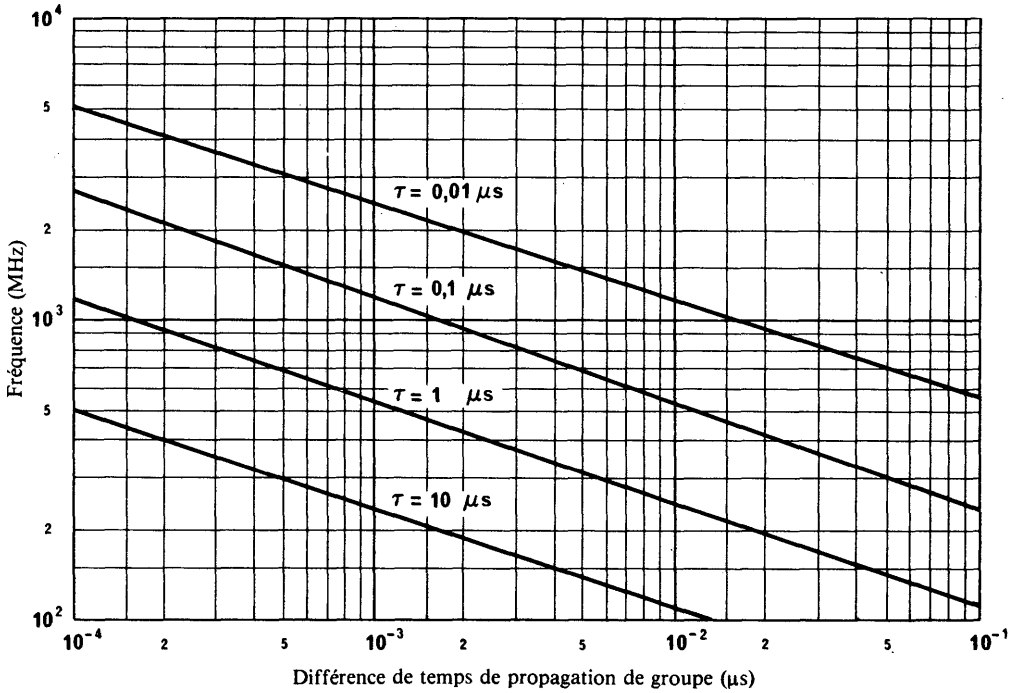


FIGURE 11 – *Différence de temps de propagation de groupe entre les fréquences inférieure et supérieure du spectre d'une impulsion de largeur τ se propageant dans l'ionosphère sur un trajet unidirectionnel [d'après Millman, 1967]*

$\int n_e \, ds = 5 \times 10^{17}$ électrons/m^2

τ: longueur des impulsions

A l'approche du maximum d'un cycle solaire (nombre de taches solaires égal approximativement à 100), on peut s'attendre, pour la rotation diurne, à des valeurs de crête allant jusqu'à environ 2° à 4 GHz (Rapport de découplage = 29 dB) en certains emplacements d'Amérique du Nord [Lee, 1977]. Le Rapport 555 fait état d'une valeur de crête un peu plus élevée à 4 GHz (9°).

Le Tableau VI donne des valeurs des ordres de grandeur en jeu, dans des communications typiques entre une station de latitude moyenne et un satellite géostationnaire, déduites de mesures faites à Tokyo (35°42′ N, 139°29′ E) sur les émissions du satellite ETS-II à 130° E. A 300 km d'altitude, la distance zénithale pour le trajet était de 40,5°. Ce tableau indique la rotation de Faraday, en degrés, qui serait dépassée pendant les pourcentages de temps indiqués, dans les conditions suivantes: fréquence, 1 GHz; durée: une année complète d'observations; périodes d'activité solaire maximale et minimale.

TABLEAU VI — *Rotation de Faraday à 1 GHz, dépassée pendant des pourcentages de temps indiqués*

Pourcentage de temps	99	90	50	10	1	0,1	0,01	Période	R_{12}
Rotation (degrés)	3	7	23	43	64	75	82	1979-80	157
	1	2	7	14	30	41	47	1977-78	42

5. Effets de réfraction et variations de la direction d'arrivée

Quand des ondes radioélectriques se propagent obliquement à travers l'ionosphère, elles subissent une réfraction, principalement due au gradient de densité électronique. Celui-ci étant lui-même souvent inhomogène dans l'espace, une multiplication des trajets des ondes se produira. Sur les divers trajets, les ondes ont une amplitude et un temps de propagation différents les uns des autres. La déviation et la propagation par trajets multiples ainsi observées auront généralement pour effet d'augmenter l'angle de site apparent d'une source radioélectrique et, par conséquent, d'introduire une erreur dans la position angulaire de cette dernière. La propagation par trajets multiples prend de l'importance dans deux cas. L'un est celui d'une propagation sous des angles de site faibles où les irrégularités de la densité électronique stratifiées horizontalement dans l'ionosphère produisent une réfraction des ondes. Dans ce cas, l'effet le plus perceptible est la modification de l'angle d'arrivée. A une altitude constante comprise entre 300 et 1000 km, cet effet atteint un maximum, de l'ordre de quelques milliradians à 100 MHz pour un angle de site compris entre 3° et 5°, et il diminue quand la hauteur s'élève et que l'angle de site augmente [Millman, 1967]. En outre, il est inversement proportionnel au carré de la fréquence et varie pendant les heures du jour par suite des variations du contenu électronique.

L'autre cas de propagation par trajets multiples est celui d'une propagation dans une direction qui suit les lignes du champ géomagnétique où les irrégularités à grande échelle sont généralement alignées sur le champ magnétique. Les variations de la réfraction et, par conséquent, de la direction d'arrivée des signaux transionosphériques, sont dues par ailleurs aux déplacements d'irrégularités ionosphériques d'étendue moyenne ou à grande échelle qui traversent la ligne de visibilité. Ces irrégularités, dont la taille varie entre des dizaines et des centaines de kilomètres, sont fréquemment associées à des perturbations itinérantes et donnent lieu à des fluctuations de la direction d'arrivée, de périodes d'environ 15 min à une heure ou davantage [Vitkevich, 1958; Wild et autres, 1959; Lawrence et Jespersen, 1961; Bramley, 1974]. C'est pendant les heures du jour qu'on les observe le plus généralement. L'ampleur de la fluctuation est typiquement de l'ordre de 1 milliradian à la fréquence 100 MHz et, là encore, elle est inversement proportionnelle au carré de la fréquence.

6. Résumé des effets ionosphériques terrestres

On a passé en revue l'ampleur et le comportement de différents effets ionosphériques. Chacun d'eux peut avoir son importance dans la conception de tel ou tel type de liaison spatiale. Ces effets diminuent lorsque la fréquence augmente; plusieurs d'entre eux peuvent être atténués même dans des gammes de fréquences où ils seraient cependant capables de poser de sérieux problèmes.

Le Tableau VII contient la liste des valeurs *maximales* auxquelles on peut s'attendre pour les effets ionosphériques, à la fréquence 1 GHz. On a admis que le contenu électronique total d'une colonne de l'ionosphère au zénith était de l'ordre de 10^{18} électrons/m^2. On a également admis un angle de site d'environ 30°. Les valeurs indiquées concernent la propagation des ondes dans un seul sens à travers l'ionosphère.

TABLEAU VII – *Valeurs maximales estimées des effets ionosphériques à la fréquence 1 GHz pour un angle de site d'environ 30° dans le cas d'une propagation dans un seul sens*

Effet	Grandeur	Variation en fonction de la fréquence
Rotation de Faraday	108^0	$1/f^2$
Temps de propagation	0,25 µs	$1/f^2$
Réfraction	< 0,17 milliradians	$1/f^2$
Variation de la direction d'arrivée	0,2 min d'arc	$1/f^2$
Absorption (calotte polaire)	0,04 dB	$\sim 1/f^2$
Absorption (aurorale + calotte polaire)	0,05 dB	$\sim 1/f^2$
Absorption (latitudes moyennes)	< 0,01 dB	$1/f^2$
Dispersion	0,4 ns/MHz	$1/f^3$
Scintillation	voir le § 2 du Rapport	voir le § 2 du Rapport

7. Effets sur la propagation extra-terrestre

On observe des effets de propagation dus aux milieux ionisés lorsque le trajet traverse la couronne solaire. Le Tableau VIII indique les caractéristiques de ce phénomène, à la fréquence 2,3 GHz, pour un trajet situé à 4 rayons solaires du centre du Soleil [Smith et Edelson, 1979].

TABLEAU VIII

Effet	Magnitude
Rotation de Faraday	20-200°
Temps de propagation de groupe	17 µs
Elargissement angulaire	0,02-2 min d'arc
Elargissement spectral	7-16 Hz
Absorption	négligeable
Dispersion	10 ns/MHz
Intensité de la scintillation	saturation (m = 1)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AARONS, J. [1977] Equatorial scintillations: A review. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-25, **5**, 729-736.

AARONS, J. [1982] Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 360-378.

AARONS, J. et MARTIN, E. [1975] The effects of the August 1972 magnetic storms on ionospheric scintillation. *Radio Sci.*, **10**, 547-554.

AARONS, J., MULLEN, J. P., KOSTER, J. R., DaSILVA, R. F., MEDEIROS, J. R., MEDEIROS, R. T., BUSHBY, A., PANTOJA, J., LANAT, J. et PAULSON, M. R. [1980] Seasonal and geomagnetic control of equatorial scintillations in two longitudinal sectors. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 42, **9-10**, 861-866.

AARONS, J., MULLEN, J. P., WHITNEY, H. E., JOHNSON, A. L. et WEBER, E. J. [1981] UHF scintillation activity over polar latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 8, **3**, 277-280.

AARONS, J. et WHITNEY, H. E. [1968] Ionospheric scintillations at 136 MHz from a synchronous satellite, *Planet. and Space Sci.*, Vol. 16, 21-28.

AARONS, J., WHITNEY, H. E. et ALLEN, R. S. [1971] Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*, Vol. 59, 159-172.

AGY, V. [1975] On the geographic distribution of auroral absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 681-685.

ALPERT, J. L. [1963] Etude de l'atmosphère supérieure sur la base de mesures de l'effet Doppler sur des signaux des satellites aux fréquences cohérentes (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, **1**, 10-24.

ARENDT, P. R., PAPAYOANOU, A. et SOICHER, H. [1965] Determination of the ionospheric electron content utilizing satellite signals. *Proc. IEEE*, Vol. 53, 268-277.

BAILEY, D. K. [1964] Polar cap absorption. *Planet. and Space Sci.*, **12**, 495-541.

BAILEY, D. K. et HARRINGTON, J. M. [1962] A survey of polar cap absorption events (solar proton events) in the period 1952 through 1960. *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, Supplément A-II, 334.

BASLER, R. P. [1966] Annual variation of auroral absorption, *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, 982-984.

BASU, S. [1975] Universal time seasonal variations of auroral zone magnetic activity and VHF scintillations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 4725-4728.

BASU, S. et AARONS, J. [1980] The morphology of high-latitude VHF scintillation near 70° W. *Radio Sci.*, Vol. 15, **1**, 59-70.

BASU, S. et KHAN, B. K. [1976] Model of equatorial scintillations from in-situ measurements. *Radio Sci.*, Vol. 11, 821-832.

BASU, S., McCLURE, J. P., BASU, S., HANSON, W. B. et AARONS, J. [1980] Coordinated study of equatorial scintillation and *in situ* and radar observations of night-time F region irregularities. *J. Geophys. Res.*, Vol. 85, 5119.

BELLCHAMBERS, W. H., PIGGOTT, W. R. et BARCLAY, L. W. [1962] *Royal Society IGY Expedition, Halley Bay*, **2**, 209. Royal Society, Londres, Royaume-Uni.

BENT, R. B., LLEWELLYN, S. K., NESTERCZUK, G. et SCHMID, P. E. [1975] The development of a highly-successful world-wide empirical ionospheric model and its use in certain aspects of space communications and world-wide total electron content investigations. Proc. Symposium on the Effect of the Ionosphere on Space Systems and Communications, 23-38. Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

BISCHOFF, K. et CHYTIL, B. [1969] A Note on Scintillation Indices. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 17, 1059-1066.

BRAMLEY, E. N. [1974] Fluctuations in direction and amplitude of 136 MHz signals from a geostationary satellite, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 36, 1503-1513.

BRIGGS, B. H. et PARKIN, I. A. [1963] On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 25, 334-365.

CHYTIL, B. [1967] The Distribution of Amplitude Scintillation and the Conversion of Scintillation Indices, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 29, 1175-1177.

CORNEC, J. P. [1978] Amplitude scintillations of ATS-6 radio signals in Lannion. Proc. Symposium COSPAR Satellite Beacon Group on Beacon Satellite Beacon Measurements of Plasmaspheric and Ionospheric Properties, Florence, mai 1978. Publié par l'Instituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche, Consiglio Nazionale delle Ricerce (CNR), Florence, Italie, 40-1 à 40-14.

CRANE, R. K. [1974] Morphology of Ionospheric Scintillation. Tech. Note 1974-29, Lincoln Laboratory MIT, Lexington, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

CRANE, R. K. [1975] Spectra of Amplitude and Phase Scintillation. Proc. of the IES Symposium, Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

CRANE, R. K. [1976] Spectra of ionospheric scintillations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, **13**, 2041-2050.

CRANE, R. K. [1977] Ionospheric scintillation. *Proc. IEEE*, Vol. 65, 180-199.

CRANE, R. K. [1978] Variance and spectra of angle-of-arrival and Doppler fluctuations caused by ionospheric scintillation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, **A5**, 2091-2102.

DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph 80 (également disponible auprès de Dover Press, New York, Etats-Unis d'Amérique).

DRIATSKIY, V. M. [1966] Study of the space and time distribution of auroral absorption according to observations of the riometer network in the arctic. *Geomagn. i Aeronom.*, **6**, 828-834.

FANG, D. J. [1980] 4/6 GHz ionospheric scintillation measurements. AGARD Conf. Proc. N° 284. Propagation Effects in Space/Earth Paths, 33-1 à 33-12.

FANG, D. J., KENNEDY, D. J. et DEVIEUX, C. [1978] Ionospheric scintillations at 4/6 GHz and their system impact. IEEE Electronics and Aerospace Systems (EASCON '78) Publ. N° CH1352-4/78/0000-0385, Washington, DC 20402, Etats-Unis d'Amérique.

FANG, D. J. et LIU, C. H. [1983] A morphological study of gigahertz equatorial scintillations in the Asian region. *Radio Sci.*, Vol. 18, 241-252.

FANG, D. J. et PONTES, M. S. [1981] 4/6 GHz ionospheric scintillation measurements during the peak of sunspot cycle 21. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 11, **2**, 293-320.

FRANKE, S. J., LIU, C. H. et FANG, D. J. [1984] Multifrequency study of ionospheric scintillation at Ascension Island. *Radio Sci.*, Vol. 19, 695-706.

FREMOUW, E. J., LIVINGSTON, R. C. et MILLER, D. A. [1980] On the statistics of scintillating signals. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 42, 717-731.

FREMOUW, E. J., LIVINGSTON, R. C., RINO, C. L., COUSINS, M., FAIR, B. C. et LEADABRAND, R. L. [1978] Complex-signal scintillation – early results from the DNA-OO2 coherent beacon. *Radio Sci.*, Vol. 13, **1**, 167-187.

FREMOUW, E. J. et RINO, C. L. [1973] An empirical model for average F-layer scintillation at VHF/UHF. *Radio Sci.*, Vol. 8, 213-222.

FUJITA, M., OGAWA, T. et KOIKE, K. [1978] 1.7 GHz scintillation measurements at midlatitude using a geostationary satellite beacon. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 963-968.

FUJITA, M., SINNO, K. et OGAWA, T. [1982] Frequency dependence of ionospheric scintillations and its application to spectral estimation of electron density irregularities. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 13-18.

HARGREAVES, J. K. [1966] On the variation of auroral radio absorption with geomagnetic activity. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 14, 991-1006.

HARGREAVES, J. K. et COWLEY, F. C. [1967] Studies of auroral space absorption. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 15, 1571-1585.

HARTZ, T. R. [1972] Morphology of radio-radar polar propagation effects. NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development. Conf. Proc. AGARD-CP-97, 1-1 to 1-18. Technical Editing and Reproduction Ltd., Londres, Royaume-Uni.

HARTZ, T. R., MONTBRIAND, L. E. et VOGAN, E. L. [1963] A study of auroral absorption at 30 Mc/s. *Can. J. Phys.*, **41**, 581-595.

HOFFMAN, W. C. [1960] *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, 3-36. Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

HOLT, C., LANDMARK, B. et LEID, F. [1961] Analysis of riometer observations obtained during polar radio blackouts. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 23, 229-243.

HOOK, J. L. [1968] Morphology of auroral zone radiowave absorption in the Alaska sector. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 30, 1341-1351.

HOUMINER, Z., AARONS, J. et RICH, F. [1981] Production and dynamics of high-latitude irregularities during magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 9939.

IIDA, T., MURATA, K. et ISHIDA, T. [1973] Measurement of the Attenuation of 9.303 MHz Waves from ISIS-II through the Ionosphere. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 20, 17-33.

IIDA, T. et YAMAYA, K. [1976] Method of direct reception of swept-frequency topside sounder signals from ISIS-II through the ionosphere. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 23, 111-138.

JOINT SATELLITE STUDIES GROUP [1965] A synoptic study of scintillations of ionospheric origin in satellite signals. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 13, 51-62.

KARASAWA, Y. et YASUKAWA, K. [1981] Gradual change of power spectrum of ionospheric scintillation. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, Vol. E64, 9.

KARASAWA, Y., YASUKAWA, K. et YAMADA, M. [mai-juin 1985] Ionospheric scintillation measurements at 1.5 GHz in mid-latitude region. *Radio Sci.*, Vol. 20, **3**.

KOSAKA, K., AWAKA, J. et OTSU, Y. [1979] Measurement of relative propagation delay between C- and K-band satellite loops. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 893-895.

KOSTER, J. R. [1963] Some measurements of the irregularities giving rise to radio star scintillations at the equator. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, **9**, 2579-2590.

KOSTER, J. R. [1966] Ionospheric studies using the tracking beacon of the Early Bird synchronous satellite. *Ann. de Géophys.*, Vol. 22, 435-439.

KOSTER, J. R. [1972] Equatorial scintillations. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 20, 1999-2014.

LAWRENCE, R. S. et JESPERSEN, J. L. [1961] Refraction effects of large-scale ionospheric irregularities observed at Boulder, Colo. Space Research II, Proc. 2nd International Space Science Symposium, 227.

LEE, M. C., DAS GUPTA, A., KLOBUCHAR, J. A., BASU, S. et BASU, S. [mars-avril 1982] Depolarization of VHF geostationary satellite signals near the equatorial anomaly crests. *Radio Sci.*, Vol. 17, **2**, 399-409.

LEE, M. K. [1977] Cross-polarization performance of the RCA Satcom system. *RCA Rev.*, Vol. 38, 171-210.

MAYNARD, L. A. [1972a] L-band ionospheric fading measurements at Ottawa. Communication présentée à IMCO Panel of Experts for Maritime Satellites.

MAYNARD, L. A. [1972b] Ionospheric fading margins at 1550 MHz at Churchill. Communication présentée à IMCO Panel of Experts for Maritime Satellites.

MAYNARD, L. A. [1976] Channel fading on air mobile satellite communications links. AGARD Conf. Proc. N° 173, Radio Systems and the Ionosphere, Athènes, Grèce.

MIKKELSEN, I. S., AARONS, J. et MARTIN, E. [1978] Geometrical considerations of 136 MHz amplitude scintillation in the auroral oval. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 479-483.

MILLMAN, G. H. [1967] A survey of tropospheric, ionospheric and extraterrestrial effects on radio propagation between the earth and space vehicles. Propagation Factors in Space Communications. AGARD Conf. Proc. N° 3, 3-55, Technivision.

MILLMAN, G. H. et OLSEN, K. A. [1980] Ionospheric dispersion effects on wideband transmissions. AGARD Conf. Proc. N° 284, Propagation Effects in Space/Earth Paths, 26-1 à 26-12.

MINAKOSHI, H., SINNO, K., KAN, M., KURIHARA, H. et FURUTA, O. [1981] Severe ionospheric scintillation associated with magnetic storm on March 22, 1979. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 28, **125/126**, 1-9.

MULLEN, J. P. [1973] Sensitivity of equatorial scintillation to magnetic activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1187-1194.

MYERS, W. J., GJELDUM, R. J., LIU, C. H. et YEH, K. C. [1979] A study of ionospheric scintillations of phase and quadrature components. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 2039-2048.

OGAWA, T., SINNO, K., FUJITA, M. et AWAKA, J. [1980] Severe disturbances of VHF and GHz waves from geostationary satellites during a magnetic storm. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 42, 7, 637-644.

ORTNER, J., HULTQVIST, B., BROWN, R. R., HARTZ, T. R., HOLT, O., LANDMARK, B., HOOK, J. L. et LEINBACH, H. [1962] Cosmic noise absorption accompanying geomagnetic storm sudden commencements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 4169-4186.

OTT, R. H. [1977] Observed temporal amplitude and phase spectra from ATS-6 radio beacon experiment at 40, 140 and 360 MHz. *Radio Sci.*, Vol. 12, **2**, 319-325.

PAPET-LEPINE, J. [1978] Influence de l'ionosphère sur la précision des mesures en géodésie par satellite artificiel. Operational modelling of the aerospace environment. AGARD Conf. Proc. N° 238, Vol. 1, 24-1 à 24-19.

PAULSON, M. R. et HOPKINS, R. U. F. [1973] Effects of equatorial scintillation fading on Satcom signals. Naval Electronics Laboratory Center, TR-1875, San Diego, Calif., Etats-Unis d'Amérique.

PAULSON, M. R. et HOPKINS, R. U. F. [1977] Spatial diversity characteristics of equatorial scintillation for satellite signals at UHF and L-band. Naval Ocean Systems Center, TR113, NTIS, Accession N° ADA040628. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PONNAPPA, P. [1973] High latitude ionospheric fading measurements at 254 MHz (VHF) and 1550 MHz (L-Band) at Churchill, Manitoba. TER-RD-254 Telecommunications and Electronics Branch Air, Ministry of Transport, Ottawa, Canada.

RAWER, K. [1964] Erforschung der Ionosphäre mit Radiowellen von Satelliten und Raketen; Phasenverfahren (L'exploration de l'ionosphère à l'aide des ondes radioélectriques provenant des satellites et des fusées; méthodes dites «de phase»). *Space Sci. Revs.*, **3**, 380-432.

RINO, C. L. [1978] Evidence for sheetlike auroral ionospheric irregularities. *J. Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1039-1042.

RINO, C. L. [1979] A power law phase screen model for ionospheric scintillation. 1. Weak Scatter. *Radio Sci.*, Vol. 14, **6**, 1135-1145.

RINO, C. L. et FREMOUW, C. L. [1973] Statistics for Ionospherically Diffracted UHF/VHF Signals. *Radio Sci.*, **8**, 223-233.

RUFENACH, C. L. [1972] Power-Law Wavenumber Spectrum Deduced from Ionospheric Scintillation Observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 4751-4772.

SESSIONS, W. B. [1972] Amplitude fading of simultaneous transionospheric L-band and VHF signals received at the geomagnetic equator. NASA X-810-72-282, Goddard Space Flight Center, National Aeronautical and Space Administration, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique.

SINGLETON, D. G. [1970] The effect of irregularity shape on radio star and satellite scintillations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 315-343.

SINNO, K. et KAN, M. [1978] Mid-latitude ionospheric scintillation of VHF radio signals associated with peculiar fluctuations of Faraday rotation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 503-506.

SINNO, K. et KAN, M. [1980] Ionospheric scintillation caused by spread-F and sporadic-E over Kokubunji, Japon. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 27, 53-77.

SINNO, K. et MINAKOSHI, H. [1983] Experimental results on satellite scintillations due to field-aligned irregularities at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 563-567.

SKINNER, N. J., KELLEHER, R. F., HACKING, J. B. et BENSON, C. W. [1971] Scintillation fading of signals in the SHF band. *Nature Phys. Sci.*, Vol. 232, 19-21.

SLACK, F. F. [1972] Quasiperiodic scintillation in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 34, 927-939.

SMITH, E. K. et EDELSON, R. E. [1979] Radio propagation through solar and other extraterrestrial ionized media. JPL Publications 79-117. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif. 91109, Etats-Unis d'Amérique.

TATARSKI, V. I. [1967] *Radio Propagation in a Turbulent Medium.* English translation by P. Silverman. McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

TAUR, R. R. [1973] Ionospheric scintillations at 4 and 6 GHz. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 3, **1**, 145-163.

TAUR, R. R. [1974] Ionospheric Scintillation at Frequencies above 1 GHz, *COMSAT Tech. Rev.*, **4**, 461-476.

TAUR, R. R. [1976] Simultaneous 1.5 and 4 GHz ionospheric scintillation measurements. *Radio Sci.*, Vol. 11, 1029-1036.

UMEKI, R., LIU, C. H. et YEH, K. C. [1977a] Multifrequency spectra of ionospheric amplitude scintillations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 2752-2770.

UMEKI, R., LIU, C. H. et YEH, K. C. [1977b] Multifrequency studies of ionospheric scintillations. *Radio Sci.*, Vol. 12, 311-317.

VITKEVICH, V. V. [1958] Investigation of ionospheric inhomogeneities by radioastronomical methods. *Radioteknika i Elektronika*, **3**, 478-486.

WAND, R. H. et EVANS, J. V. [1975] Morphology of Ionospheric Scintillation in the Auroral Zone, Proc. IES Symposium, Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

WHITNEY, H. E., AARONS, J., ALLEN, R. S. et SEEMANN, D. R. [1972] Estimation of the cumulative amplitude probability distribution function of ionospheric scintillations. *Radio Sci.*, Vol. 7, 1095-1104.

WHITNEY, H. E. et BASU, S. [1977] The effect of ionospheric scintillation on VHF/UHF satellite communication. *Radio Sci.*, Vol. 12, 123-133.

WHITNEY, H. E. et RING, W. F. [1971] Dependency of scintillation fading of oppositely polarized VHF signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-19.

WILD, J. P., SHERIDAN, K. V. et NEYLAN, A. A. [1959] An investigation of the speed of the solar disturbances responsible for Type III radio bursts. *Austral. J. Phys.*, **12**, 369-398.

YEH, K. C., LIU, C. H. et YOUAKIM, M. Y. [1975] A theoretical study of the ionospheric scintillation behaviour caused by multiple scattering. *Radio Sci.*, Vol. 10, 97-106.

RECOMMANDATION 532

MODIFICATIONS DE L'IONOSPHÈRE PROVOQUÉES PAR DES ÉMISSIONS DE GRANDE PUISSANCE

(Programme d'études 28F/6)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'on sait depuis longtemps qu'il peut se produire un phénomène de transmodulation en ondes kilométriques et hectométriques lorsque des émissions de puissance surfacique élevée traversent l'ionosphère (voir le Rapport 574);

b) qu'il a maintenant été prouvé qu'il peut se produire une modification de l'ionosphère, notamment dans la région F, du fait de l'existence d'une puissance surfacique élevée dans la gamme de fréquences de 2 à 12 MHz environ, surtout aux grands angles de rayonnement et aux fréquences tout juste inférieures aux MUF de référence pour les couches intéressées au voisinage de l'incidence verticale et que de telles modifications peuvent permettre la propagation à des fréquences allant jusqu'à 400 MHz environ et sur des distances allant jusqu'à 4000 km (voir le Rapport 728);

c) que, si les administrations ne mettent pas un frein à la croissance des puissances d'émission, l'ionosphère pourra se trouver défavorablement affectée, avec ce résultat que tant les services faisant appel à l'ionosphère comme milieu de propagation que les services en ondes métriques par onde de sol risqueront de subir une dégradation à la réception,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que l'on veille à réduire les puissances surfaciques excessives créées, aux altitudes de l'ionosphère, sur des fréquences allant jusqu'à 12 MHz environ, et que l'on prenne des mesures à cet effet;

2. que l'on tienne compte des données exposées dans les Rapports 574 et 728 lorsque l'on envisagera de mettre en œuvre des systèmes susceptibles de donner lieu à des puissances surfaciques élevées;

3. que les administrations poursuivent l'étude des effets dont il est question dans la présente Recommandation.

RAPPORT 574-2

TRANSMODULATION IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 28F/6)

(1974-1978-1986)

1. Introduction

La théorie fondamentale des phénomènes non-linéaires dans un plasma, telle qu'elle a été formulée par Ginzburg et Gurevich [1960] et par Gurevich [1971], prolonge les travaux antérieurs de Bailey [1937] sur l'interaction des ondes ou «transmodulation». En bref, la propagation d'ondes modulées de grande puissance dans un plasma provoque dans celui-ci des perturbations qui font varier la température des électrons, et ces variations, à leur tour, affectent la fréquence de collision, les caractères chimiques des ions et la densité électronique et, par conséquent, la conductivité et la permittivité du milieu. Ces modifications produites dans le milieu par une seule onde radioélectrique intense modulée ont pour résultat la superposition de la modulation de cette onde sur la porteuse d'une autre onde se propageant dans la même région. Vu le grand nombre d'émissions en ondes décamétriques, hectométriques et kilométriques pour lesquelles la propagation s'effectue à travers les régions D et E, cette interaction entre les ondes, ou transmodulation ionosphérique, est difficile à distinguer du brouillage dans le même canal, et encore plus difficile à mesurer [Huxley, 1950, 1955; Fejer, 1955; Ratcliffe et Shaw, 1948; Shaw, 1951; Bell, 1966; Hibberd, 1964; Cutolo, 1964, etc.].

Des mesures effectuées lorsque les bandes de fréquences étaient moins encombrées ont été résumées par Knight [1973]; elles font apparaître des taux de transmodulation inférieurs à 7% pour une puissance d'émission normalisée à 100 kW. Les mesures normalisées sont présentées sur la Fig. 1 de l'Annexe I à la Recommandation 498.

2. La théorie simple de la transmodulation ionosphérique

Pour les ingénieurs des télécommunications qui s'intéressent à l'évaluation du brouillage produit par la transmodulation, une méthode plus simple est possible; le présent document a pour objet d'exposer les caractéristiques principales d'une méthode indiquée par Huxley et Ratcliffe [1949]; il est conçu pour donner du phénomène une explication physique simple.

2.1 *Le processus de collision des électrons*

Les électrons libres, qui sont essentiellement à l'origine de la réaction de l'ionosphère sur les ondes radioélectriques, sont situés dans la région D et la basse région E de l'ionosphère et peuvent être considérés comme un constituant gazeux, statistiquement en équilibre thermique avec les autres molécules beaucoup plus nombreuses de l'atmosphère. On peut considérer que chaque électron a une énergie thermique Q_0 et une vitesse V_0 qui sont reliées à la température θ_0 de l'atmosphère par l'équation des gaz:

$$Q_0 = \frac{1}{2} mV_0^2 = \frac{3}{2} k\theta_0 \tag{1}$$

dans laquelle m est la masse de l'électron ($9{,}1 \times 10^{-31}$ kg), k la constante de Boltzmann ($1{,}37 \times 10^{-23}$ joules par Kelvin), θ_0 étant exprimé en Kelvins, Q_0 et V_0 en unités du système MKS.

Si, au point considéré, l'équilibre est perturbé par une augmentation de la vitesse des électrons, qui devient V, les grandeurs Q_0 et θ_0 deviennent respectivement Q et θ conformément à l'équation (1), la température de l'atmosphère ambiante restant inchangée. Il n'existe pas de preuve formelle permettant d'affirmer que la fréquence de collision des électrons dépend de V dans la basse région de l'ionosphère, mais l'on supposera ici que le libre parcours moyen des électrons est indépendant de leur vitesse, de telle sorte que la fréquence de collision ν augmente à partir de sa valeur à l'état d'équilibre ν_0 proportionnellement à V. On obtient donc:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\nu^2}{\nu_0^2} = \frac{\theta}{\theta_0} \tag{2}$$

A chaque collision, une certaine quantité d'énergie est transférée dans l'atmosphère ambiante, cette quantité étant proportionnelle à l'excédent d'énergie et égale à $G(Q - Q_0)$, G étant une constante dont, d'après des expériences faites en laboratoire sur l'azote, on a pu fixer la valeur à environ 10^{-3}. L'équilibre est perturbé par le passage d'une onde radioélectrique et, si l'on désigne par Q_e l'énergie extraite de l'onde par un électron lors d'une collision à l'instant t, l'équation représentant l'énergie de l'électron est la suivante:

$$\frac{dQ}{dt} = \nu Q_e - \nu G(Q - Q_0)$$

ce qui, d'après l'équation (2), peut s'exprimer comme suit:

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{Q_e \nu_0^2}{2 Q_0} - \frac{G}{2}(\nu^2 - \nu_0^2) \tag{3}$$

Si Q_e avait une valeur constante, ν prendrait finalement une valeur $\bar{\nu}$, donnée par l'expression suivante:

$$\bar{\nu} = \nu_0 \left(1 + \frac{Q_e}{GQ_0}\right)^{1/2} \tag{4}$$

sauf peut-être lorsque le champ est très élevé, $Q_e \ll GQ_0$ et, par conséquent $\nu - \nu_0 \ll \nu_0$.

Par conséquent, lorsque l'énergie Q_e est extraite, $\nu - \nu_0$ décroît exponentiellement jusqu'à zéro avec une constante de temps $1/G\nu_0$. Dans la région de l'ionosphère considérée, ν_0 est de l'ordre de 10^6 collisions par seconde, de telle sorte que cette constante de temps est d'environ 10^{-3} seconde ce qui correspond à une fréquence de 1000 Hz. Il s'ensuit que la fréquence de collision ne peut pas suivre les variations qui se produisent dans l'onde aux fréquences radioélectriques.

Etant donné toutefois que Q_e est proportionnel à la densité de puissance de l'onde et, par conséquent, au carré du champ électrique E, la fréquence de collision peut suivre la valeur efficace du champ. Si cette valeur efficace est modulée en amplitude par une fréquence acoustique, la fréquence de collision pourra dans une certaine mesure suivre la modulation pour des fréquences ne dépassant guère 500 Hz.

2.2 *Le processus de modulation*

En général, la modulation appliquée à l'onde radioélectrique contient de nombreuses fréquences acoustiques mais, pour évaluer le taux de transmodulation, il suffit de prendre une seule fréquence $\omega/2\pi$ et d'étudier seulement la composante de cette fréquence dans le carré du champ. La valeur efficace du champ radioélectrique s'exprime donc comme suit:

$$E = E_0 (1 + M \cos \omega t) \tag{5}$$

on prendra, pour le carré de cette valeur:

$$E^2 = E_0^2 \left(1 + \frac{M^2}{2}\right) + E_0^2 \, 2M \cos \omega t \tag{6}$$

où $M = 1$ pour un taux de modulation de 100%.

La valeur moyenne de E^2 est donc nettement supérieure à E_0^2, et c'est cette valeur accrue qui détermine la moyenne de ν dans l'équation (4), cependant que ν est de la forme:

$$\nu = \bar{\nu} (1 + M_\nu) \tag{7}$$

où M_ν est la modulation déterminée d'après le terme de modulation de l'équation (6).

Si l'on exprime Q_e sous la forme:

$$Q_e = CE^2 \tag{8}$$

on obtiendra la constante de proportionnalité C en tenant compte de l'affaiblissement de l'onde radioélectrique dû aux collisions électroniques lors de sa traversée de l'ionosphère et en prenant $\nu_0 M_\nu$ comme composante de la modulation de ν dans l'équation (7); l'équation de transmodulation déduite des expressions (3), (6) et (8) est alors la suivante:

$$\nu_0 \frac{dM_\nu}{dt} = \frac{\nu_0^2 \, CE_0^2 \, 2M \cos \omega t}{2Q_0} - \frac{G}{2} \, 2\nu_0 (\nu_0 M_\nu)$$

ou

$$\frac{dM_\nu}{dt} + G\nu_0 M_\nu = \frac{\nu_0 \, CE_0^2 \, M \cos \omega t}{Q_0}$$

par conséquent:

$$|M_\nu| = \frac{CE_0^2 \, M}{Q_0 \, G \left[1 + \left(\frac{\omega}{G\nu_0}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{9}$$

Le dénominateur montre comment la réponse diminue aux fréquences acoustiques élevées.

2.3 *Le processus d'absorption*

Lorsque l'onde radioélectrique traverse l'ionosphère, la perte correspondant à l'énergie extraite par les électrons au cours des collisions lui fait subir un affaiblissement exponentiel correspondant à un facteur de réduction de l'amplitude, $\exp(-\int \alpha ds)$, l'intégrale étant calculée sur le trajet de transmission et α étant un coefficient d'absorption. Si l'on considère l'absorption de l'onde qui traverse une couche mince ayant une section transversale d'aire unité, on démontre que l'énergie Q_e extraite par chaque électron lors d'une collision a pour expression:

$$Q_e = \frac{2\alpha\mu E^2}{N\nu \, Z_0} \tag{10}$$

μ étant la partie réelle de l'indice de réfraction de l'ionosphère selon l'équation d'Appleton-Hartree, N la densité électronique (nombre d'électrons par m^3) et Z_0 l'impédance de l'espace libre, le champ E étant exprimé en V/m.

Etant donné que la fréquence radioélectrique peut être voisine de la fréquence gyromagnétique f_H, il est important d'inclure l'effet du champ magnétique terrestre en considérant le cas où cet effet est le plus important, c'est-à-dire lorsque la propagation se fait dans la direction du champ. On sait alors que l'expression de α est:

$$\alpha = \frac{Ne^2 Z_0 \nu}{2\mu m [4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + \nu^2]} \tag{11}$$

e étant la charge de l'électron ($1{,}60 \times 10^{-19}$ coulomb), f la fréquence radioélectrique en Hz, les signes + et − correspondant respectivement à l'onde ordinaire et à l'onde extraordinaire.

Compte tenu des expressions (8), (10) et (11), on a:

$$C = \frac{e^2}{m [4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + \nu^2]} \tag{12}$$

Pour cette évaluation de la transmodulation, on peut négliger le terme ν^2 du dénominateur si, par exemple, $4\pi^2 (f \pm f_H)^2 > 10\nu^2$, ou $(f \pm f_H) > \nu/2$. Aux fréquences des ondes décamétriques et hectométriques, ce critère s'applique assez bien, sauf pour l'onde extraordinaire lorsque la fréquence est proche de la gyrofréquence, qui est de l'ordre de 1 MHz, où il se produit une résonance qui augmente la valeur de C. Dans ces conditions de résonance, notamment pour les émissions de grande puissance, la valeur de $\nu - \nu_0$ est comparable à celle de ν_0, et l'équation (4) − compte tenu des équations (8) et (12) − doit être considérée comme une équation quadratique en $(\overline{\nu})^2$. Aux fréquences plus basses, où f est du même ordre de grandeur que ν ou inférieur à ν, il faut traiter l'ensemble du problème d'une façon beaucoup plus élaborée en considérant une onde complète.

En portant dans (9) l'expression de C donnée par (12), on trouve:

$$|M_\nu| = \frac{2e^2 E_0^2 M}{3 m k \theta_0 \left[4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + \nu_0^2\right] G \left[1 + \left(\frac{\omega}{G\nu_0}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{13}$$

où Q_0 est donné par (1), et en considérant en première approximation que ν^2 au dénominateur est égal à ν_0^2, conformément à l'hypothèse faite pour établir l'équation (9), à savoir que C est une constante, pour une fréquence porteuse donnée.

2.4 *Démodulation et transmodulation*

Comme l'affaiblissement de l'onde a la forme d'un facteur de réduction de l'amplitude, le fait que α dans l'équation (11), dépend directement de ν implique que la modulation transférée de l'onde à la fréquence de collision réagit sur l'amplitude de l'onde. Il en résulte en fait une certaine démodulation de l'onde et ce phénomène présente énormément d'intérêt lorsqu'on procède à des expériences de modulation pour étudier la structure physique des régions inférieures de l'ionosphère. Dans ce cas, il est absolument nécessaire de faire une analyse statistique du mouvement électronique beaucoup plus détaillée que celle qui a été adoptée ici, ainsi qu'une étude approfondie de la résonance gyromagnétique.

Encore plus important toutefois est le fait que la modulation imposée à α peut également être transférée au facteur de réduction d'amplitude d'une autre onde ayant une fréquence différente et passant dans la zone de modulation produisant ainsi une transmodulation. En dehors de son importance physique, ce phénomène est à l'origine d'un brouillage qui va maintenant être évalué. En principe, l'effet est mutuel, chaque onde étant dans une certaine mesure démodulée et modulant l'autre, mais il est maintenant souhaitable de faire une distinction entre les fréquences et de considérer une des émissions comme étant une émission utile, avec sa propre modulation subissant une modulation supplémentaire produite par une émission non désirée ou perturbatrice. Si l'on désigne les fréquences par f_W et f_D respectivement, la fréquence f de l'équation (13) devient maintenant f_D.

Soit ρ le facteur de réduction de l'amplitude de l'onde utile; son expression, d'après les équations (7) et (11), est la suivante:

$$\rho = \exp\left(-\int \frac{Ne^2 Z_0 \overline{\nu} (1 + M_\nu)\, ds}{2\mu m [4\pi^2 (f_W \pm f_H)^2 + \nu^2]}\right) \tag{14}$$

L'intégration s'étend sur la zone de transmodulation, qui est de dimensions limitées en raison de l'affaiblissement subi par l'onde perturbatrice pendant sa traversée de l'ionosphère; de ce fait, la modulation indiquée par (13), qui est subie par la fréquence de collision, diminue en même temps que E_0. Cette zone peut toutefois être suffisamment étendue pour que l'augmentation de N et la diminution de ν avec la hauteur dans l'ionosphère aient de l'importance pour l'évaluation de ρ dans l'équation (14). En définitive, le produit $N\nu$ diminue mais, initialement, il peut augmenter avec la hauteur.

Le front d'une onde met si peu de temps à traverser la zone considérée que l'on peut envisager l'équation (14) comme une intégration sur toute cette zone pour une durée infiniment petite de l'échelle des temps des fréquences acoustiques. M_v demeure donc constant dans le temps pendant l'intégration et l'étude de la variation temporelle de M_v aux fréquences acoustiques montre que ρ est modulé et peut être exprimé comme suit en fonction d'une valeur moyenne et d'une modulation M_ρ :

$$\rho = \bar{\rho}\,(1 + M_\rho) \tag{15}$$

par conséquent:

$$\log_e \rho = \log_e \bar{\rho} + \log_e (1 + M_\rho)$$

ou encore, puisqu'on peut admettre que $M_\rho \ll 1$

$$\log_e \rho = \log_e \bar{\rho} + M_\rho \tag{16}$$

Etant donné que $M_\rho = 0$ lorsque $M = 0$, il s'ensuit que, d'après les équations (14) et (16):

$$\log_e \bar{\rho} = -\int \frac{Ne^2\, Z_0\, \bar{\nu}\, ds}{2\mu m\,[4\pi^2\,(f_W \pm f_H)^2 + \bar{\nu}^2]} \tag{17}$$

$$M_\rho = -\int \frac{Ne^2\, Z_0\, \bar{\nu}\, M_v\, ds}{2\mu m\,[4\pi^2\,(f_W \pm f_H)^2 + \bar{\nu}^2]} \tag{18}$$

dans les dénominateurs de ces expressions, on a négligé la modulation sur ν^2 en utilisant la valeur moyenne.

On peut maintenant calculer l'intégrale de M_ρ dans (18), en isolant M_v (valeur moyenne) et en conservant formellement dans l'intégrale N et ν, qui dépendent de l'emplacement; on déduit ainsi de l'équation (17), en termes d'amplitudes:

$$|\,M_\rho\,| = -\,|\,M_v\,|\,\log_e \bar{\rho} \tag{19}$$

d'où, d'après l'équation (13):

$$|M_\rho| = -\,\frac{2e^2 E_0^2\, M \log_e \bar{\rho}}{3m\,k\theta_0 \left[4\pi^2\,(f_D \pm f_H)^2 + \nu_0^2\right] G \left[1 + \left(\frac{\omega}{G\nu_0}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{20}$$

avec une valeur moyenne estimée de E_0^2 dans la zone de modulation. C'est à ce résultat qu'ont abouti essentiellement Huxley et Ratcliffe [1949].

La détermination de $\log_e \bar{\rho}$ d'après l'équation (17) implique que l'on connaisse la distribution de N et de ν dans la zone de modulation pour un modèle donné d'ionosphère. Huxley et Ratcliffe font remarquer que le facteur de réduction $\bar{\rho}$ peut être déterminé d'après des mesures du coefficient de réflexion de l'ionosphère pour la fréquence de l'onde utile, en supposant qu'il n'y a pas d'absorption avec déviation au voisinage du point de réflexion dans l'ionosphère, toute l'absorption se produisant au niveau de la zone de transmodulation, et en se souvenant que la modulation ne se produit pas toujours sur les deux trajets, montant et descendant. Si $\bar{\rho}$ est exprimé par un affaiblissement positif D en décibels, on a:

$$D = -\,20 \log_{10} \bar{\rho} = -\,8{,}7 \log_e \bar{\rho} \tag{21}$$

Si, par ailleurs, la zone de transmodulation se trouve à une distance d km de l'émetteur brouilleur rayonnant une p.i.r.e. de P kW dans la direction de cette zone, on a:

$$E_0 = \frac{0{,}1732}{d}\sqrt{P} \qquad \text{V/m} \tag{22}$$

On peut alors constater, d'après les équations (20), (21) et (22), qu'avec les valeurs numériques de e, de m et de k déjà données, avec la valeur $G = 1{,}3 \times 10^{-3}$ indiquée par Huxley et Ratcliffe et avec la valeur $\theta_0 = 300$ K de l'atmosphère au niveau de la zone de modulation, on a:

$$|M_\rho| = \frac{0{,}31\ PDM}{d^2\left[(f_D \pm f_H)^2 + 0{,}025\nu_0^2\right]\left[1 + \dfrac{2{,}34 \times 10^{-5}}{\nu_0^2} f_M^2\right]^{1/2}} \qquad (23)$$

où f_D, f_H, et ν_0 sont exprimés en MHz et la fréquence de modulation $f_M = \omega/2\pi$ en Hz.

3. Théorie améliorée

Tout en constituant un guide utile, la théorie simple de Huxley et Ratcliffe ne convient peut-être pas toujours pour évaluer les niveaux probables de transmodulation. En classant une situation donnée dans l'une des cinq catégories de base, le Tableau I [Maslin, 1976c] montre dans quelles conditions on peut prévoir que la théorie simple risque d'être insuffisante et comment on peut facilement la modifier de manière à obtenir des prévisions plus fiables. Par exemple, les calculs effectués d'après les résultats expérimentaux montrent que le transfert de modulation est plus élevé que prévu lorsque le niveau de réflexion de l'onde utile est situé dans la région perturbée [Maslin, 1976b]. Toutefois, si la région perturbée se trouve à une très faible altitude dans l'ionosphère, une augmentation de la puissance moyenne de l'onde perturbatrice n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la modulation transférée à l'onde utile [Maslin, 1976a]. Il s'agit respectivement d'exemples des cas III et I du Tableau I.

4. Discussion

Une méthode simple pour établir l'équation approximative de la transmodulation est donnée sous forme symbolique (20) et sous forme numérique (23). La méthode est fondée sur la notion de changement d'absorption causé par le changement de la fréquence de collision, qui est le lien entre la modulation de l'onde perturbatrice et la modulation transférée sur l'onde utile. Le § 3 et l'Annexe I à la Recommandation 498 indiquent certains des facteurs dont dépend le taux de transmodulation.

Comme on pouvait le prévoir, la transmodulation est directement proportionnelle au taux de modulation de l'onde perturbatrice et à la puissance rayonnée par l'émetteur brouilleur dans la direction de la zone de modulation dans l'ionosphère. La dépendance de la transmodulation à l'égard de l'affaiblissement subi par l'onde utile dans la zone de modulation souligne le fait que l'onde doit non seulement traverser cette zone pour arriver au point de réception situé à la surface de la Terre mais qu'elle doit aussi subir une absorption au cours du processus. Par conséquent, bien que la transmodulation ne dépende pas intrinsèquement de la puissance de l'émission utile, cette puissance doit être suffisante pour que le signal reçu survive à l'affaiblissement dû à l'absorption dans la zone en question. Une valeur typique de D serait 10 dB si l'affaiblissement n'est pas excessif, mais il est évident que le phénomène ne se produira pas à des fréquences suffisamment élevées pour que l'absorption soit très faible, en raison de la valeur élevée de f_W dans l'équation (14).

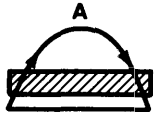
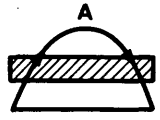
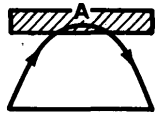
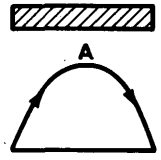
L'effet direct du champ magnétique terrestre sur l'onde utile est implicite pour déterminer la valeur de D tirée de celle de $\bar{\rho}$. C'est sur l'onde extraordinaire que cet effet est maximal et, dans certaines conditions, l'absorption peut être effectivement totale et ne laisser que la transmodulation sur l'onde ordinaire. La réception de signaux transmodulés dépend par conséquent des caractéristiques de polarisation des antennes d'émission et de réception et de l'heure du jour.

Le rôle joué par le champ magnétique terrestre est plus évident pour l'onde brouilleuse, comme on peut le voir dans l'équation (23). L'émission peut être destinée à être reçue par l'onde de sol (bandes hectométriques ou kilométriques), la propagation se faisant avec une forte absorption de l'onde abordant l'ionosphère. Il est évident que l'onde extraordinaire est particulièrement efficace pour moduler la fréquence de collision lorsque la fréquence perturbatrice est voisine de la gyrofréquence. Par ailleurs, l'absorption de l'onde limite le volume de la zone de transmodulation et, par conséquent, l'affaiblissement de l'onde utile traversant cette zone. Dans une étude plus rigoureuse de l'énergie de l'onde perturbatrice absorbée par le milieu, on doit utiliser l'effet combiné de l'onde ordinaire et de l'onde extraordinaire [Maslin, 1974, 1975a et b].

La relation entre M_ρ et M_ν dans l'équation (19) est fondée sur une valeur moyenne de M_ν, ce qui implique une valeur moyenne de ν_0 dans l'équation (23) et une puissance P légèrement inférieure à la p.i.r.e. effective de l'émetteur brouilleur. La fréquence de collision a une influence prédominante sur la résonance gyromagnétique de l'onde extraordinaire mais, par ailleurs, la diminution rapide de ν_0 lorsque l'altitude augmente restreint surtout la gamme des fréquences acoustiques dans laquelle la transmodulation se produit. Les valeurs de ν_0 diminuent de manière exponentielle avec l'altitude et la nuit généralement on compte 10^6 collisions par seconde à 81 km et 10^5 collisions par seconde à 94 km. Knight [1968] a étudié des informations détaillées sur les paramètres ionosphériques et les caractéristiques d'affaiblissement correspondantes, pour différentes altitudes et sur différentes fréquences. Il a aussi présenté un exposé très utile sur l'effet gyromagnétique.

TABLEAU I – *Catégories relatives à l'estimation de la transmodulation*

Le trajet de l'onde utile est représenté en relation avec la région perturbée

Cas	I	II	III	IV	V
Configuration					fréquence de l'onde perturbatrice voisine de la gyrofréquence
Emplacement de la région perturbée	nettement au-dessous de A	au-dessous de A	proche de A ou en A	au-dessus de A	en un point quelconque
M_p (relative)	petite	moyenne	grande	petite	grande (si la géométrie convient)
Théorie simple	insuffisante	suffisante	insuffisante	insuffisante	insuffisante
Exemples	$f_W \approx 10 f_D$ ou $f_W > 10 f_D$	$C_D f_D < C_W f_W$	$f_W > f_D$ $(C_D f_D \approx C_W f_W)$	$10 f_W < f_D$ ou $f_D \approx f_W$ $(C_D f_D > C_W f_W)$	émetteur perturbateur proche de la trajectoire de l'onde utile

où C_D C_W sont les cosinus des angles d'incidence, dans l'ionosphère, respectivement des ondes perturbatrices et utiles.

Lorsque la fréquence de l'onde brouilleuse augmente et dépasse la gyrofréquence, la transmodulation finit par varier comme f_D^{-2}.

On peut mettre ensuite l'équation (23) sous une forme simple approchée:

$$P = \frac{3{,}2 \mid M_\rho \mid d^2 f_D^2}{MD} \quad \text{kW} \tag{24}$$

Pour évaluer la gêne que le brouillage risque de causer à l'onde utile, on admet que $\mid M_\rho \mid = 0{,}03$, que l'onde perturbatrice est modulée à 40% (c'est-à-dire que $M = 0{,}4$), enfin que $D = 10$ dB. Dans ces conditions, à la fréquence 1,6 MHz, pour la distance $d = 150$ km correspondant à une onde incidente sur l'ionosphère sous un angle de 45° environ, il faut que la puissance de l'onde perturbatrice ne dépasse pas 1,4 MW pour que la transmodulation soit acceptable. Avec les p.i.r.e. que l'on peut actuellement obtenir en ondes hectométriques, il semble vraisemblable que les brouillages dus à la transmodulation risquent de se produire, d'autant plus que la formule simplifiée (24) exclut les effets possibles de résonance gyromagnétique. En revanche, une étude faite dans les mêmes conditions pour les fréquences supérieures à 5 MHz montre que même les p.i.r.e. très élevées couramment employées en radiodiffusion à ondes décamétriques ne sont probablement pas de nature à engendrer une modulation suffisante pour être gênante.

5. Jones et autres [1972] ont fait des mesures expérimentales de la transmodulation subie par des signaux de fréquence allant jusqu'à 20 kHz, en utilisant comme signal utile les émissions de WWVL (Fort Collins, Colorado) (Etats-Unis d'Amérique) et comme signal perturbateur celles de Platteville, Colorado (Etats-Unis d'Amérique). La p.i.r.e. de l'émetteur de Platteville est de 50 MW [Utlaut, 1970]. La Fig. 1 montre quelques résultats des extensions de ces essais à l'aide de l'émission de WWVB (Fort Collins) sur 60 kHz comme signal utile et d'une émission sur 7,4 MHz de Platteville comme signal perturbateur [Utlaut, 1974]. Les mesures ont été faites à Bennett (Colorado). Les deux polarisations, ordinaire et extraordinaire, du signal de Platteville ont été utilisées. Comme il y avait lieu de s'y attendre, les effets de transmodulation ont été beaucoup plus intenses pour la polarisation extraordinaire que pour la polarisation ordinaire.

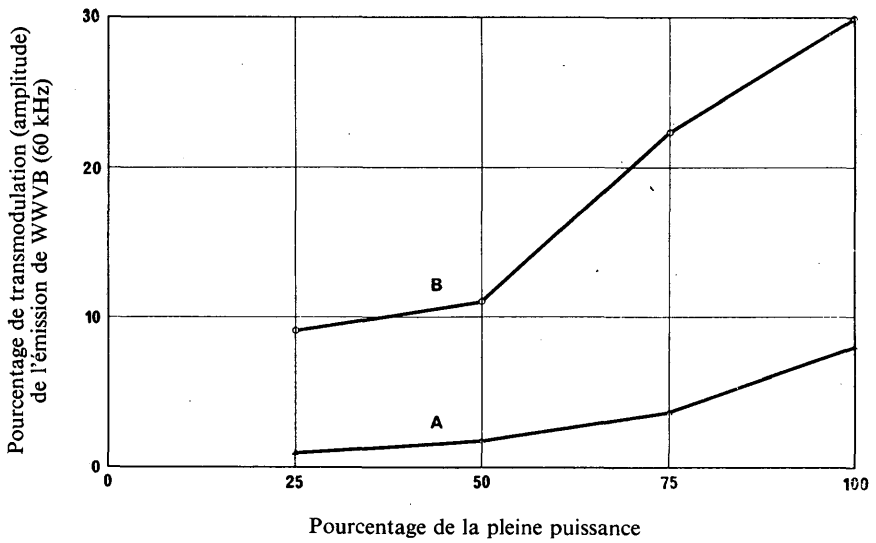


FIGURE 1 – *Transmodulation du signal à 60 kHz de WWVB (reçu à Bennett, Colorado) transmis par l'émetteur de Platteville fonctionnant sur 7,4 MHz avec une p.i.r.e. maximale de 50 MW et un taux de modulation de 100% à 10 Hz*

Antenne de Platteville: Courbe A: onde à polarisation ordinaire
Courbe B: onde à polarisation extraordinaire

6. L'interprétation des effets de transmodulation s'est en grande partie limitée aux variations de conductivité (transfert de modulation résultant des variations de l'affaiblissement du signal utile), sans tenir compte des variations de la permittivité. Ces dernières variations, qui peuvent résulter de la présence de signaux provenant d'émetteurs de grande puissance, donnent à penser que les signaux utiles faisant appel à une modulation autre que la modulation d'amplitude peuvent également être affectés par un phénomène de transmodulation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAILEY, V. A. [1937] On some effects caused in the ionosphere by electric waves. Partie I, *Phil. Mag.*, **23**, 929-960.

BELL, C. D. [1966] Investigation of problems encountered in wave interaction experiments at high power. Ionosphere Research Lab. Scientific Report No. 262, Ionosphere Research Lab., Pennsylvania State University.

CUTOLO, M. [1964] On some resonance phenomena near the gyrofrequency obtained during the propagation of a radio wave in plasma. NBS Tech. Note No. 211, **2**, 1-69.

FEJER, J. A. [1955] The interaction of pulsed radio waves in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **7**, 322-332.

GINZBURG, V. L. et GUREVICH, A. V. [1960] Phénomènes non linéaires dans un plasma placé dans un champ électromagnétique alternatif (en russe). *Usp. Soviet Fiz.*, **3**, 175-195.

GUREVICH, A. V. [1971] Disturbance of the ionosphere by radio waves (en russe). *Geomag. i Aeronom.*, **11**, 953 (en anglais, p. 803).

HIBBERD, F. H. [1964] Wave interactions at oblique incidence near the gyrofrequency. NBS Tech. Note No. 211, **4**, 45-64.

HUXLEY, L. G. H. [1950] Ionospheric cross-modulation at oblique incidence. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. A200, 486-511.

HUXLEY, L. G. H. [1955] Comment on the theory of radio wave interaction. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. A229, 405-407.

HUXLEY, L. G. H. et RATCLIFFE, J. A. [1949] A survey of ionospheric cross-modulation. *Proc. IEE*, Part III, **96**, 433-440.

JONES, T. B., DAVIES, K. et WIEDER, B. [1972] Observations of D region modifications at low and very low frequencies. *Nature*, **238**, 33-34.

KNIGHT, P. [1968] Ionospheric non-linearity. BBC Research Department, Report No. RA-17.

KNIGHT, P. [1973] LF and MF propagation. A study of ionospheric cross-modulation measurements. *BBC Eng.*, **94**, 12-21.

MASLIN, N. M. [1974] Theory of energy flux and polarization changes of a radio wave with two magnetoionic components undergoing self demodulation in the ionosphere. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 341A, 361-381.

MASLIN, N. M. [1975a] Theory of the modifications imposed on the ionospheric plasma by a powerful radio wave reflected in the D or E region. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 343A, 109-131.

MASLIN, N. M. [1975b] Theory of heating in the lower ionosphere by obliquely incident waves from a powerful point transmitter. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 346A, 37-57.

MASLIN, N. M. [1976a] The effect of a time varying collision frequency on a radio wave obliquely incident on the lower ionosphere. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 348A, 245-263.

MASLIN, N. M. [1976b] Theory of the modulation imposed on a obliquely incident radio wave reflected in a disturbed region of the lower ionosphere. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 349A, 555-570.

MASLIN, N. M. [1976c] Estimating ionospheric cross-modulation. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 351A, 277-293.

RATCLIFFE, J. A. et SHAW, I. J. [1948] A study of the interaction of radio waves. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. A193, 311-343.

SHAW, I. J. [1951] Some further investigations of ionospheric cross-modulation. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. B64, 1-20.

UTLAUT, W. F. [1970] An ionospheric modifications experiment using very high power, high frequency transmission. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6402-05.

UTLAUT, W. F. [1974] A survey of ionospheric modification effects produced by high-power HF radio waves. AGARD Conf. Proc. 138, 3-1 to 3-16 (Conference on Non-linear Effects in Electromagnetic Wave Propagation). National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

RAPPORT 728-2

MODIFICATIONS DE L'IONOSPHÈRE PROVOQUÉES PAR DES ÉMISSIONS RADIOÉLECTRIQUES DE GRANDE PUISSANCE, A PARTIR DU SOL

(Programme d'études 28F/6)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

La modification du plasma ionosphérique par des émissions radioélectriques de grande puissance se décompose en un échauffement ionosphérique ohmique, qui est un processus non linéaire mais classique, et en la génération d'instabilités paramétriques par des processus d'interaction ondulatoire non linéaires. Un aspect du premier phénomène, la transmodulation ionosphérique, est traité dans le Rapport 574.

La plupart des expériences de modification de l'ionosphère ont été faites en ondes décamétriques, et elles concernent le plus souvent la production de changements dans l'ionosphère supérieure (150-400 km) au moyen d'émetteurs construits à cet effet, fonctionnant à des fréquences proches des fréquences critiques de la région F. Si la fréquence modificatrice est inférieure à la fréquence critique, la modification est dite «sur-dense»; en revanche, si elle est supérieure à la fréquence critique, la modification est dite «sous-dense».

Des expériences ont été faites avec des émetteurs fonctionnant à des fréquences des bandes s'étendant des ondes myriamétriques aux ondes décimétriques, qui ont provoqué des modifications dans toutes les régions de l'ionosphère. Ces expériences ont permis une nouvelle compréhension de la physique du plasma. Elles ont aussi montré, et c'est peut-être plus important, que la région modifiée peut avoir un effet important sur les signaux de radiocommunication qui la traversent. Un résultat des expériences de modification de l'ionosphère est la production d'irrégularités alignées le long du champ magnétique terrestre, qui diffusent les ondes radioélectriques dans une large gamme de fréquences jusqu'au moins 435 MHz [Utlaut, 1975]. La communication par diffusion à grande distance via ces irrégularités a été démontrée par Barry [1974].

Des séries d'articles sur les expériences de modification de l'ionosphère ont été publiées dans des numéros spéciaux de Radio Science [1974] et du Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics [1982] et par l'ESA [1983].

2. Théorie de l'échauffement ohmique

2.1 *Introduction*

Les travaux théoriques de Ginzburg et Gurevich [1960], Farley [1963], Meltz et Lelevier [1970], Stubbe et Kopka [1977], Gurevich [1978] et Perkins et Roble [1978] ont suggéré que l'échauffement du plasma par dissipation ohmique devrait produire des changements à grande échelle de la température électronique et par suite de la densité électronique et d'autres paramètres. Beaucoup de phénomènes non linéaires tiennent au fait que la fréquence de collision dépend de la température électronique.

2.2 *Théorie simplifiée de l'échauffement ohmique*

La théorie simplifiée exposée ci-après montre comment l'échauffement ohmique peut se produire. Une onde de champ électrique E et de fréquence angulaire ω est considérée comme traversant une couche de plasma ionosphérique avec une fréquence de collision effective ν entre électrons et ions ou neutres. Ce champ agit sur les électrons, de masse m et de charge e, et les accélère. Mais les collisions les retardent et de l'énergie est extraite de l'onde, ce qui a pour résultat une augmentation de la température électronique. Bien que les électrons deviennent plus chauds, ils ne transfèrent qu'une petite partie de leur énergie excédentaire aux ions ou aux neutres durant les collisions, car la masse de ces électrons est beaucoup plus faible que celle des ions ou des neutres. Dans la région F, la fréquence de collision électron-ion est $\leqslant 10^3$/s, la fraction de la perte d'énergie par collision est $\leqslant 10^{-4}$ et la constante de temps pour la perte d'énergie est donc environ de 10 s. Ce faible taux de perte rend possible un échauffement appréciable des électrons. L'échauffement de la région E est moins facile. Ici, la fréquence de collision électron-neutre est environ 2×10^5/s, la perte d'énergie fractionnelle par collision est 5×10^{-3} et par conséquent, la constante de temps pour la perte d'énergie est seulement environ 1 ms. Une forte absorption de l'onde radioélectrique incidente se produit dans la région où la fréquence du plasma électronique est proche de la fréquence radioélectrique. Ceci est dû au fait que l'onde est ralentie près de cette résonance naturelle, et que les électrons ont davantage de chances de heurter les particules lourdes.

Considérons pour simplifier que les fréquences radioélectriques sont suffisamment plus grandes que la fréquence cyclotron locale des électrons (environ 1,3 MHz) pour rendre négligeables les effets du champ géomagnétique.

Comme les mouvements des ions peuvent être négligés, l'application de la deuxième loi de Newton donne pour la vitesse directionnelle des électrons, $\underline{V}$:

$$m \frac{\mathrm{d}\underline{V}}{\mathrm{d}t} = -e\underline{E} - m\nu\underline{V} \tag{1}$$

La modification de la température électronique due à l'onde incidente se trouve par application du principe de la conservation de l'énergie. En une unité de temps, le champ électrique de l'onde accomplit sur le plasma un travail:

$$\underline{J} \cdot \underline{E} = -eN\underline{V} \cdot \underline{E} \tag{2}$$

où:

N: densité numérique des électrons et

$\underline{J}$: densité de courant.

Inversement, durant ce temps, les électrons perdent de l'énergie du fait des collisions et donc:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{3}{2} NkT_e\right) = eN\underline{V} \cdot \underline{E} - \frac{3}{2} G\nu Nk(T_e - T) \tag{3}$$

où:

G: perte d'énergie fractionnelle moyenne en une collision

T: température de l'espèce de collision

T_e: température électronique

k: constante de Boltzmann.

Si le champ électrique est représenté par:

$$\underline{E} = \underline{E}_0 \exp(-j\omega t) \tag{4}$$

la vitesse des électrons se tire de l'équation (1):

$$\underline{V} = \underline{V}_0 \exp(-j\omega t) \tag{5}$$

où:

$$\underline{V}_0 = -eE_0 / m \left(\frac{\nu + j\omega}{\nu^2 + \omega^2} \right) \tag{6}$$

En première approximation, la partie oscillatoire de l'échauffement peut être négligée et la résolution de l'équation (3) donne:

$$\Delta T = T_e - T = \left(\frac{E_0}{E_p} \right)^2 T \tag{7}$$

où:

$$E_p^2 = \frac{3kTmG}{e^2} (\omega^2 + \nu^2) \tag{8}$$

E_p est le champ électrique nécessaire pour produire une forte perturbation thermique de la température du plasma ionosphérique et, pour $\omega \gg \nu$, il va d'environ $3 \times 10^{-4} f$(mV/m) dans les régions D et E jusqu'à environ $10^{-4} f$(mV/m) dans la régionF [Walker, 1979]. f est la fréquence de l'onde perturbatrice en Hz. Ces champs impliquent des puissances isotropes rayonnées équivalentes d'environ 100 MW.

3. Théorie de l'instabilité paramétrique

L'instabilité onde-plasma paramétrique implique généralement une interaction à trois ondes. Dans le contexte d'une modification de l'ionosphère, une onde électromagnétique décamétrique de grande puissance fournit le champ moteur initial dont l'énergie cascade en une onde de plasma électronique électrostatique de fréquence inférieure et en une onde acoustique ionique de fréquence inférieure.

Le mécanisme non linéaire responsable de la plupart des instabilités paramétriques dans l'ionosphère est la force de pression thermique [Perkins, 1974; Fejer, 1979] plutôt que la force dite pondéromotrice [Chen, 1974]. La force pondéromotrice provient des termes non linéaires (force convective et force de Lorentz) dans l'équation du mouvement des électrons, et s'applique à un plasma sans collision. Les perturbations de la température des électrons dues à l'échauffement par l'onde introduisent une force de pression thermique supplémentaire dans l'équation du mouvement des électrons. Cette force de pression thermique prédomine sur la force pondéromotrice et donne naissance à des irrégularités ionosphériques alignées sur les lignes de force du champ.

De plus amples détails sur la théorie ont été fournis par Meltz et Perkins [1974], Perkins et autres [1974], Fejer et Leer [1972a, b] et Lee et Kuo [1983]. Fejer [1979] a présenté une synthèse de ce sujet.

4. Effets de modification

Beaucoup d'expériences de modification en ondes décamétriques ont été réalisées depuis 1970 en utilisant des installations construites spécialement (par exemple [Utlaut, 1970; Stubbe et autres, 1982a; Gurevich et Migulin, 1982]), avec des puissances d'émission typiques de 1 ou 2 MW et des gains d'antenne conduisant à une puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) comprise approximativement entre 100 et 250 MW. Une modification importante de l'ionosphère a aussi été produite en utilisant 160 kW de puissance et une antenne à doublets croisés d'un gain de seulement 8 dBi (fournissant une p.i.r.e. d'environ 0,5 MW avec un rendement de 50%) [Utlaut et autres, 1974]. Les puissances surfaciques dans la région F de l'ionosphère pour des p.i.r.e. de 100 MW et 0,5 MW sont au plus, respectivement, d'environ 100 et 0,5 μWm^{-2}, si l'on néglige l'absorption de l'ionosphère à basse altitude. Ces valeurs peuvent être réduites de 6 dB ou davantage lorsqu'on considère l'absorption qui se produit dans la basse ionosphère.

Certains effets importants de modification causés par des ondes radioélectriques décamétriques (et d'autres fréquences) chauffantes sont décrits ci-après.

Aux altitudes inférieures à 200 km, les électrons heurtent surtout des neutres, la fréquence de collision augmente avec la température et les ondes radioélectriques fortes sont absorbées plus que les faibles. L'autodémodulation, voir par exemple [King, 1959], en est un résultat. Au-dessus de 200 km, là où les électrons heurtent surtout des ions, la fréquence de collision diminue avec la température et les ondes radioélectriques fortes sont absorbées moins que les faibles; dans ce cas, il y a automodulation.

Le mécanisme de la transmodulation ionosphérique dans la région D est traité dans le Rapport 574, et ses effets dans l'Annexe I à la Recommandation 498.

Non seulement les ondes décamétriques de grande puissance peuvent provoquer des modifications de la haute ionosphère, mais encore ces mêmes ondes, émises sous forme d'impulsions, peuvent engendrer des ondes myriamétriques et plus longues encore du fait de modifications produites dans la basse ionosphère. Getmansev et autres [1974, 1977] ont montré que des émissions d'ondes décamétriques puissantes peuvent exciter un rayonnement électromagnétique sur la fréquence de modulation de l'onde décamétrique responsable de l'échauffement; Kapustin et autres [1977] ont constaté que cet effet est renforcé dans les régions aurorales. Ferraro et autres [1982], Stubbe et autres [1981, 1982b] ont mentionné la réception d'ondes «extrêmement longues» (plus longues que les ondes myriamétriques), provenant de la détection ionosphérique d'ondes décamétriques modulées par des ondes «extrêmement longues» émises par un émetteur voisin de Tromsø (Norvège). Les aspects théoriques de cette expérience ont été étudiés en détail par Stubbe et Kopka [1977]. Cannon [1982], ainsi que Cannon et autres [1982] ont mis en évidence le fait que des ondes myriamétriques et plus longues encore avaient été engendrées par des émissions de radiodiffusion à ondes longues et moyennes. Cannon [1982] a montré comment des signaux de radiodiffusion à ondes longues et moyennes peuvent échauffer la région aurorale D ou E en modulant l'électrojet auroral qui émet à son tour des signaux de longueur d'onde myriamétrique ou supérieure. On ne pensait pas que la modulation de l'électrojet auroral par les ondes décamétriques à effet thermique provoquerait d'importantes perturbations du champ géomagnétique [Willis et Davis, 1973]. Cependant, des expériences effectuées à Tromsø (Norvège) à l'aide des installations EISCAT ont mis en évidence des perturbations pouvant aller jusqu'à 10,8 γ [Stubbe et Kopka, 1981]. Kuo et Lee [1983] ont émis l'hypothèse que ces perturbations étaient excitées par l'instabilité de «filamentation» des ondes décamétriques de grande puissance.

Des perturbations de la densité électronique se produisent si l'échauffement est maintenu pendant un temps suffisamment long. Aux altitudes inférieures à environ 200 km, une augmentation de la densité électronique se produit parce que le coefficient de recombinaison dissociative diminue quand la température augmente [Gurevich, 1971]. Tomko et autres [1980a] ont développé un modèle théorique de la chimie ionique de la région D qui s'applique aux conditions de l'échauffement ionosphérique. Le modèle fournit une estimation quantitative de l'augmentation du taux d'attachement et de la diminution du coefficient de recombinaison. Les modifications des taux d'attachement et des coefficients de recombinaison dans la basse ionosphère sont importantes pour l'interprétation des données d'absorption [Tomko et autres, 1980b], des données de diffusion incohérente [Matthews et Bekeny, 1978] et des données de sondages ionosphériques [Meltz et autres, 1982]. Aux altitudes supérieures, dans la région F, les températures électroniques élevées correspondent à une augmentation de pression qui fait que le plasma s'écoule de la région échauffée le long des lignes de force du champ géomagnétique. L'énergie électromagnétique est alors concentrée dans la région de densité électronique réduite, ce qui conduit à un nouvel échauffement et à une nouvelle expansion. Des irrégularités à grande échelle de la densité électronique de la région F, alignées le long du champ géomagnétique et avec des dimensions transverses de environ 1 km, en sont le résultat. Un autre résultat de ce processus d'autoconcentration thermique est la production d'un F-diffus artificiel (voir le § 5). Perkins et Roble [1978] ont décrit les changements de la densité et de la température électroniques qui sont attendus dans les régions D, E et F durant un échauffement de l'ionosphère. Muldrew [1981] a suggéré que l'échauffement de l'ionosphère est renforcé dans des conduits naturels dès que la source d'échauffement est mise en action, ce qui provoque le développement de ces conduits; ce sont ces conduits qui sont à l'origine des raies de plasma induites par les ondes décamétriques.

L'un des effets inattendus des premières expériences de modification de l'ionosphère par des ondes décamétriques a été la production d'irrégularités de petite échelle (environ 1 m) alignées sur le champ, qui rétrodiffusent les ondes métriques et décimétriques. Des théories expliquant leur développement ont été proposées par Perkins [1974], Vaskov et Gurevich [1977], Lee et Fejer [1978], Das et Fejer [1979] et Inhester et autres [1981]. Ces irrégularités sont probablement générées environ 200 m en-dessous de la hauteur de réflexion de l'onde décamétrique chauffante, là où elle a son effet d'échauffement le plus grand [Muldrew et Showen, 1977; Muldrew, 1978]. En raison de l'importance de ces irrégularités pour les radiocommunications, elles sont traitées plus en détail dans le § 5.

Un autre résultat important des premiers travaux a été la découverte que la réflectivité de l'ionosphère à une onde de basse puissance était grandement réduite dans la région de réflexion d'un signal chauffant de grande puissance, par exemple [Utlaut et Violette, 1974]. Comme ce phénomène se produisait dans une large gamme de fréquences, on l'a appelé «absorption à large bande». Kopka et autres [1982] signalent aussi l'absorption de l'onde chauffante elle-même et, pour des puissances émises supérieures à un certain seuil, on a trouvé que le signal reçu diminue lorsque la puissance apparente rayonnée (p.a.r.) augmente. Cela peut avoir des implications pour les systèmes de communications, car cela suggère un niveau optimal de puissance émise.

5. Diffusion de signaux radioélectriques par des irrégularités induites artificiellement

Avec une p.i.r.e. de 0,5 MW ou plus, des irrégularités à grande échelle (vues comme un F-diffus sur les ionogrammes) et à petite échelle de la densité électronique, alignées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre se produisent quelques secondes après la mise en fonctionnement de l'émetteur, à la suite de l'échauffement ohmique et de l'apparition de certaines instabilités paramétriques et des ondes de plasma. Pour les signaux radioélectriques traversant la région perturbée, la conséquence est que, sur les trajets dont les deux terminaux sont au sol ainsi que sur les trajets Terre-espace, la profondeur et le taux des évanouissements augmentent. De plus, en raison des irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique, il se

produit aux altitudes comprises entre 250 et 300 km dans l'ionosphère, un effet réflecteur comparable à celui d'un radar de grande section transversale ($\approx 10^5$ à 10^9 m^2). Ces effets se manifestent lorsque la fréquence de l'émetteur qui produit la chaleur est inférieure à la fréquence critique de la région F ($\leqslant$ 12 MHz), mais coïncide avec la fréquence de plasma à une certaine altitude dans l'ionosphère.

Les propriétés de diffusion des irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique ont été utilisées pour assurer diverses transmissions – téléphoniques, télex, fac-similé, impulsions – entre des terminaux au sol séparés par des milliers de kilomètres sur des fréquences allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques qui, sans cela, n'auraient pu être employées sur ces trajets. Dans la région F, la diffusion est assez nettement sensible à la directivité. Aussi les points où les signaux sont reçus sur la Terre grâce à ce mécanisme de diffusion dépendent-ils en partie de la position géomagnétique et de la hauteur de la région de l'ionosphère qui a été modifiée. En général, les signaux peuvent être reçus dans une zone située du côté équatorial de la région modifiée, zone très étendue dans la direction est-ouest et pouvant atteindre environ 4000 km, alors qu'elle n'est que de 200 à 500 km dans la direction nord-sud. Cette zone est déterminée par des considérations géométriques qui sont représentées sur les Fig. 1 et 2. La Fig. 3 représente les zones de couverture possibles compte tenu de ce mécanisme, pour différentes latitudes géomagnétiques de la région modifiée. Rao et Thome [1974], Stathacopoulos et Barry [1974] et Utlaut [1975] ont donné des précisions sur le modèle d'irrégularité et les considérations géométriques de la diffusion.

On peut également créer une région à forte diffusion à une altitude voisine de 110 km dans la région E lorsque l'émetteur produisant l'échauffement fonctionne à des fréquences inférieures à la fréquence critique de la région E ($\approx$ 3 MHz) [Fialer, 1974]. Les observations concernant la diffusion dans la région E pendant le phénomène de modification sont plus rares, mais néanmoins elles tendent à montrer que la diffusion est moins sensible à la directivité que dans la région F et qu'ainsi les zones de réception des signaux au sol sont plus étendues dans la direction nord-sud que dans le cas de la diffusion dans la région F.

D'après les résultats des études mentionnées ci-dessus, il semble qu'il y ait à la fois une possibilité d'utiliser avantageusement une modification intentionnelle de l'ionosphère et un risque d'augmentation des brouillages due aux signaux diffusés par des régions modifiées intentionnellement ou non, dans une gamme allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques. On peut aussi prévoir que dans certaines conditions, des brouillages pourront se produire entre stations terriennes et satellites; car, comme le montre la Fig. 1, la diffusion intervient dans toutes les directions définies par le cône de diffusion et ainsi, l'énergie d'un émetteur installé au sol pourra être diffusée dans l'espace et vice versa, par les irrégularités de la région modifiée.

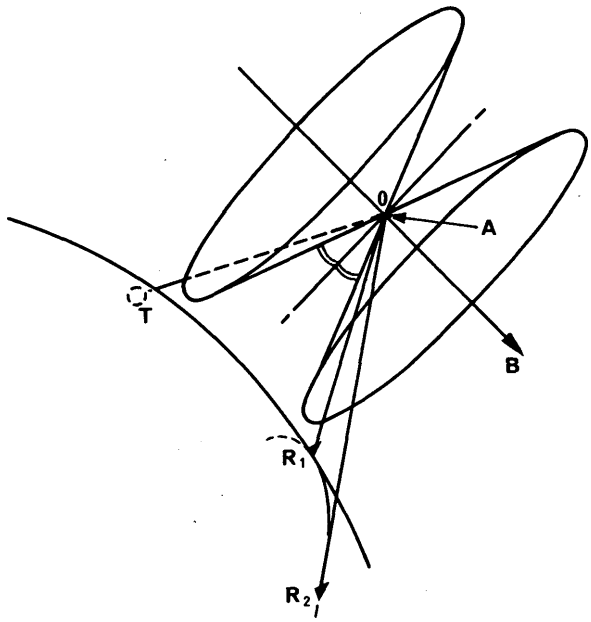


FIGURE 1 – *Les surfaces coniques représentent les trajets possibles du signal à destination et en provenance de la diffusion spéculaire suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre.*
L'intersection du cône et de la terre sphérique définit les points où les signaux en provenance d'un émetteur peuvent être reçus sur la Terre

A: point de diffusion
B: champ magnétique terrestre
R_1, R_2: emplacement du récepteur
T: emplacement de l'émetteur

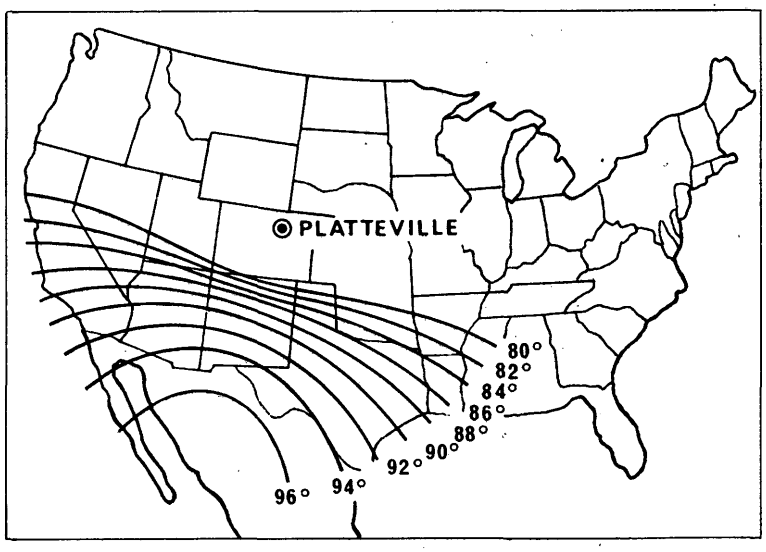


FIGURE 2 – *Contours des intersections des rayons provenant du point situé à 230 km au-dessus de Platteville et rencontrant le champ géomagnétique sous l'angle indiqué*

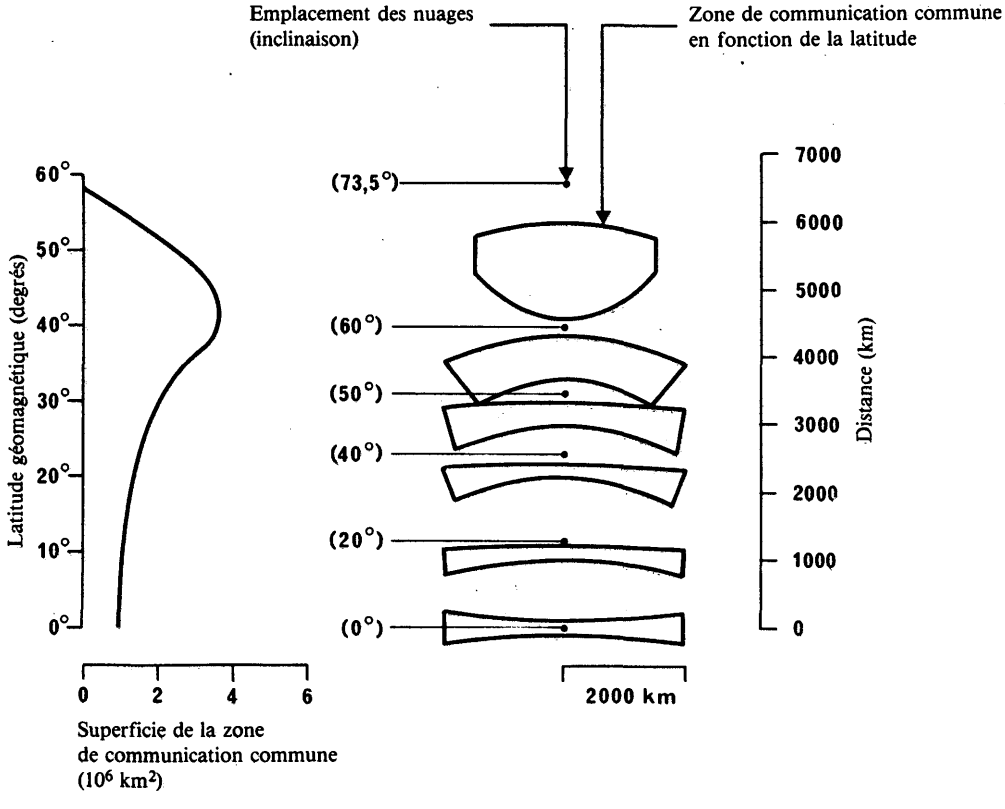


FIGURE 3 – *Zone de communication commune en fonction de la latitude*

Représentation des zones de communication sur la surface de la Terre dans lesquelles les trajets de signaux entre deux points quelconques peuvent être établis en tenant compte de la région diffusante de l'ionosphère modifiée. Les trajets de communication entre deux points donnés situés en dehors de ces zones sont également possibles et sont déterminés par des processus de réflexion spéculaire. L'étendue des diffuseurs est considérée comme étant de 100 km le long de la ligne de force du champ magnétique et centrée à une altitude de 270 km. On a supposé que la diffusion était limitée à $\pm 5°$ de la réflexion spéculaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARRY, G. H. [1974] HF-VHF communications experiment using man-made field-aligned ionospheric scatterers. *Radio Sci.*, Vol. 9, **11**, 1025-1032.

CANNON, P. S. [1982] Ionospheric ELF radio signal generation due to LF and/or MF radio transmissions – I. Experimental results. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 819-829.

CANNON, P. S., TURUNEN, T et RYCROFT, M. J. [1982] Ionospheric ELF radio signal generation due to LF and/or MF radio transmissions – II. Interpretation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 831-841.

CHEN, F. F. [1974] *Introduction to Plasma Physics.* Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.

DAS, A. C. et FEJER, J. A. [1979] Resonance instability of small-scale field-aligned irregularities. *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 6701-6704.

ESA [1983] Proceedings of the International Conference on Active Experiments in Space. Special Publication 195. Agence spatiale européenne, Neuilly, France.

FARLEY, D. T., Jr. [1963] Artificial heating of electrons in the F region of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, **2**, 401-413.

FEJER, J. A. [1979] Ionospheric modification and parametric instabilities. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 17, 135-153.

FEJER, J. A. et LEER, E. [1972a] Purely growing parametric instability in an inhomogeneous plasma. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 700-708.

FEJER, J. A. et LEER, E. [1972b] Excitation of parametric instability by radio waves in the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 4, **7**, 481-491.

FERRARO, A. J., LEE, H. S., ALLSHOUSE, R., CARROLL, K., TOMKO, A. A., KELLY, F. J. et JOINER, R. G. [décembre 1982] VLF/ELF radiation from the ionospheric dynamo current system modulated by powerful HF signals. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, **12**, 1113-1122.

FIALER, P. A. [1974] Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere – Observations at HF and VHF. *Radio Sci.*, Vol. 9, **11**, 923-940.

GETMANSEV, G. G., GULELMI, A. V., KLAIN, B. I, KOTIK, D. S., KRYLOV, S. M., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O., TRAKHTENGERTS, V. Yu. et TROITSKAYA, V. A. [1977] Excitation of magnetic pulsations under the action on the ionosphere of radiation of a powerful short-wave transmitter. *Radiophys. Quant. Electron.*, Vol. 20, 703-705.

GETMANSEV, G. G., ZUIKOV, N. A., KOTIK, D. S., MIRONENKO, L. F., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O., SAZONOV, Yu. A., TRAKHTENGERTS, V. Yu. et EIDMAN, V. Yu. [1974] Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma. *JETP Lett.*, Vol. 20, 101-102.

GINZBURG, V. L. et GUREVICH, A. V. [1960] Nonlinear phenomena in a plasma located in an alternating electromagnetic field. *Usp. Soviet Fiz.*, **3**, 115-146 et 175-194.

GUREVICH, A. V. [1971] Disturbance of the ionosphere by radio waves. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 11, 803-809.

GUREVICH, A. V. [1978] *Non-linear Phenomena in the Ionosphere.* Springer-Verlag, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

GUREVICH, A. V. et MIGULIN, V. V [1982] Investigations in the USSR of non-linear phenomena in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, **12**, 1019.

INHESTER, B., DAS, A. C. et FEJER, J. A. [1981] Generation of small-scale, field-aligned irregularities in ionospheric heating experiments. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 9101-9106.

JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND TERRESTRIAL PHYSICS [décembre 1982] Special issue: Ionospheric modification. Papers from the Twentieth General Assembly of the International Union of Radio Science. Vol. 14, **12.**

KAPUSTIN, I. N., PERTSOVSKY, R. A., VASILEV, A. N., SMIRNOV, V. S., RASPOPOV, O. M., SOLOVENA, L. E., ULYACHENKO, A. A., ARYKOV, A. A. et GALAKHOVA, N. V. [1977] Generation of radiation at combination frequencies in the region of the auroral electrojet. *JETP Lett.*, Vol. 25, 228-231.

KING, J. W. [1959] Ionospheric self demodulation and self distortion of radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 14, **44.**

KOPKA, H., STUBBE, P., JONES, T. B. et ROBINSON, T. [1982] Non-linear reflectivity of high-power radio waves in the ionosphere. *Nature*, Vol. 195, **5851**, 680.

KUO, S. P. et LEE, M. C. [1983] Earth magnetic field fluctuations produced by filamentation instabilities of electromagnetic heater waves, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 979-981.

LEE, M. C. et FEJER, J. A. [1978] Theory of short-scale field-aligned density striations due to ionospheric heating. *Radio Sci.*, Vol. 13, 893-899.

LEE, M. C. et KUO, S. P. [1983] Excitation of upper hybrid waves by a thermal parametric instability, *J. Plasma Phys.*, Vol. 30, 463-478.

MATHEWS, J. D. et BEKENY, F. S. [1978] The effect of negative ions on Thompson scattering in the presence of electron heating. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 925-927.

MELTZ, G. et LELEVIER, R. E. [1970] Heating the F region by deviative absorption of radio waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6406-6416.

MELTZ, G. et PERKINS, F. W. [1974] Ionospheric modification theory: past, present, and future. *Radio Sci.*, Vol. 9, 885-888.

MELTZ, G., RUSH, C. M. et VIOLETTE, E. J. [1982] Simulation of D and E region high-power microwave heating with HF ionospheric modification experiments. *Radio Sci.*, Vol. 17, 701-715.

MULDREW, D. B. [1978] The role of field-aligned ionization irregularities in the generation of the HF-induced plasma line at Arecibo. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 2552-2560.

MULDREW, D. B. [1981] Generation of ionospheric irregularities associated with plasma lines induced by an HF wave. *Radio Sci.*, Vol. 16, 121-125.

MULDREW, D. B. et SHOWEN, R. L. [1977] Height of the HF-enhanced plasma line at Arecibo. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 4793-4804.

PERKINS, F. W. [1974] A theoretical model for short-scale field-aligned plasma density striations. *Radio Sci.*, Vol. 9, **11**, 1065-1070.

PERKINS, F. W., OBERMAN, C. et VALEO, E. J. [1974] Parametric instabilities and ionospheric modification. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 1478-1496.

PERKINS, F. W. et ROBLE, R. G. [1978] Ionospheric heating by radio wawes: Predictions for Arecibo and the satellite power station. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 1611-1624.

RADIO SCIENCE [1974] Special issue: Ionospheric modification by high power transmitters, *Radio Sci.*, Vol. 9, **11**.

RAO, P. B. et THOME, G. S. [1974] A model for RF scattering from field-aligned heater-induced irregularities. *Radio Sci.*, Vol. 9,987-996.

STATHACOPOULOS, A. D. et BARRY, G. H. [1974] Geometric considerations in the design of communications circuits using field-aligned ionospheric scatter. *Radio Sci.*, Vol. 9, 1021-1024.

STUBBE, P. et KOPKA, H. [1977] Modulation of the polar electrojet by powerful HF waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 2319-2325.

STUBBE, P. et KOPKA, H. [1981] Generation of Pc5 pulsations by polar electrojet modulation: first experimental evidence, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 9073.

STUBBE, P., KOPKA, H. et DOWDEN, R. L. [1981] Generation of ELF and VLF waves by polar electrojet modulation. Experimental results. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 9073-9078.

STUBBE, P., KOPKA, H., LAUCHE, H., RIETVELD, M. T., BREKKE, A., HOLT, O., JONES, T. B., ROBINSON, T., HEDBERG, A., THIDE, B., CROCHET, M. et LOTZ, H. J. [1982a] Ionospheric modification experiments in northern Scandinavia. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, **12**, 1025-1041.

STUBBE, P., KOPKA, H., RIETVELD, M. T. et DOWDEN, R. L. [1982b] ELF and VLF wave generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, 1123-1136.

TOMKO, A. A., FERRARO, A. J., LEE, H. S. et MITRA, A. P. [1980a] A theoretical model of D-region ion chemistry modifications during high power radio wave heating. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 42, 275-285.

TOMKO, A. A., FERRARO, A. J. et LEE, H. S. [1980b] D-region absorption effects during high-power radio wave heating. *Radio Sci.*, Vol. 15, 675-681.

UTLAUT, W. F. [1970] An ionospheric modification experiment using very high power, high frequency transmission. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6402-6405.

UTLAUT, W. F. [1975] Ionospheric modification induced by high-power HF transmitters – A potential for extended range VHF-UHF communications and plasma physics research. *Proc. IEEE*, Vol. 63, 1022-1043.

UTLAUT, W. F. et VIOLETTE, E. J. [1974] A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification. *Radio Sci.*, Vol. 9, 895-903.

UTLAUT, W. F., VIOLETTE, E. J. et MELANSON, L. L. [1974] Radar cross section measurements and vertical incident effects observed with Platteville at reduced power. *Radio Sci.*, Vol. 9, 1033-1040.

VASKOV, V. V. et GUREVICH, A. V. [1977] Resonance instability of small-scale plasma perturbations. *Sov. Phys. JETP*, Vol. 46, 487-494.

WALKER, J. C. G. [1979] Active experimentation with the ionospheric plasma. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 17, **4**, 534-544.

WILLIS, J. W. et DAVIS, J. R. [1973] Radio frequency heating effects on electron density in the lower E region, *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 5710.

RAPPORT 893

LES SATELLITES COLLECTEURS D'ÉNERGIE SOLAIRE ET L'IONOSPHÈRE

(Programme d'études 28 F/6)

(1982)

1. Introduction

Les satellites collecteurs d'énergie solaire (SPS = Solar Power Satellites) pourraient contribuer puissamment à satisfaire les besoins futurs de la Terre en énergie. Dans l'un de ces systèmes, l'énergie solaire est recueillie par de grands panneaux de cellules solaires évoluant sur l'orbite géostationnaire, puis convertie en puissance radioélectrique en hyperfréquences, enfin rayonnée vers la Terre pour y être convertie en courant continu [Glaser, 1977].

Il convient cependant de mentionner qu'on étudie actuellement une autre solution, à savoir le transport de l'énergie sur des fréquences plus élevées [US Dept. of Energy, 1980a].

On trouvera dans le Rapport 679 la description d'un projet de système capable de transmettre une puissance radioélectrique de 5 à 10 GW à partir d'un réseau d'antennes d'environ 1 km de diamètre. L'ouverture du faisceau à demi-puissance est de 0,008°, ce qui confine ladite énergie à une colonne d'environ 5 km de diamètre; la puissance surfacique au centre de ce faisceau à la surface de la Terre est d'environ 200 W/m^2. On a fixé la fréquence à 2,45 GHz, valeur pour laquelle les effets combinés de l'ionosphère et de la troposphère devraient être réduits au minimum.

Etant donné que la puissance qui entre en jeu dans un système SPS est beaucoup plus élevée que celles que l'on rencontre habituellement dans les radiocommunications, il importe de déterminer ses conséquences sur l'environnement. Il y aura en particulier interaction du faisceau de microondes avec l'ionosphère et avec la troposphère et cela risque d'avoir de sérieures conséquences sur les services de radiocommunication existants; ces interactions peuvent à leur tour affecter la transmission du faisceau d'énergie [Hughes, 1980; Grant et autres, 1980].

La réalisation de systèmes SPS impliquerait de nombreux vols de grandes fusées appelées lanceurs de grande portance (HLLV = Heavy Lift Launch Vehicles). Il n'est pas impossible que le passage de ces gros engins consommateurs d'hydrogène ou d'hydrocarbures ait pour effet d'arracher temporairement des ions et des électrons à la région F. Il pourrait en résulter de sérieuses diminutions de la densité électronique de l'ionosphère, qui provoqueraient de graves effets sur les télécommunications. [US Dept. of Energy, 1980b].

Dans le présent Rapport, on examine les interactions qui peuvent se produire et l'on s'intéresse particulièrement aux risques de brouillage au détriment des autres services radioélectriques. Certaines de ces interactions, et leurs ramifications, sont essentiellement les mêmes que celles causées par les émissions de grande puissance en ondes décamétriques et en ondes plus longues, dont il est question dans les Rapports 728 et 574.

Le «Department of Energy» des Etats-Unis d'Amérique a publié une étude détaillée des risques de brouillages associés à l'exploitation de systèmes SPS [US Dept. of Energy, 1980c].

2. Les effets des SPS sur l'ionosphère

On peut en gros distinguer deux catégories dans les interactions avec l'ionosphère:

- les interactions passives, dans lesquelles le plasma ionosphérique influence d'une façon ou d'une autre la propagation du faisceau émis par le satellite et peut dans certains cas donner lieu à des brouillages dans la même voie par suite d'une diffusion du faisceau;
- les interactions actives, dans lesquelles le plasma ionosphérique est lui-même modifié. Un fort échauffement des électrons par le faisceau du SPS peut produire des irrégularités de l'ionisation, capables de diffuser les ondes de fréquence plus faible et par conséquence d'augmenter les risques de brouillage dans une large bande. L'émission des produits d'échappement des HLLV est également capable de modifier l'ionosphère. Les variations qui peuvent en résulter dans la composition chimique de celle-ci risquent de conduire à des diminutions de l'ionisation aux altitudes de la région F.

2.1 *Les interactions passives*

La propagation transionosphérique du faisceau émis par le satellite SPS peut être influencée par des gradients de densité électronique et par des irrégularités de l'ionosphère d'origine naturelle. Des effets de réfraction entraînent une variation plus apparente de la position de la source de ce faisceau, variation d'autant plus importante que l'angle de site est plus faible. Toutefois, pour la réception de l'énergie à des latitudes moyennes ou faibles, le déplacement apparent du faisceau ne serait que de quelques mètres aux moments où le contenu électronique de l'ionosphère est élevé. Les mécanismes de compensation qui font partie intrinsèque du système SPS corrigeront tous déplacements de ce genre du faisceau.

Plus sérieux risquent d'être les effets d'irrégularités d'origine naturelle de la densité électronique, dont on sait qu'elles produisent une scintillation des signaux qui traversent l'ionosphère. Aux fréquences de l'ordre de quelques GHz, les irrégularités qui provoquent les scintillations sont espacées d'environ 200 m à une altitude de 300 km et on peut assimiler leurs effets sur la propagation transionosphérique à ceux d'un réseau de diffraction.

De tels effets réticulaires donnent lieu à des maxima d'intensité. Pour une transmission d'énergie par un SPS, le rayonnement qui parvient à la surface de la Terre en dehors du faisceau principal serait accompagné de densités surfaciques supérieures de plusieurs ordres de grandeur à celles qui caractérisent les services spatiaux existants; il en serait ainsi dans toute la zone de la Terre visible du SPS. La transmission du faisceau du SPS à travers de telles irrégularités pourrait donc avoir de sérieuses conséquences sur les liaisons radioélectriques fonctionnant dans la même voie. On pourrait toutefois limiter ces nuisances en faisant en sorte que le faisceau évite les zones de scintillation équatoriales et de hautes latitudes.

2.2 *Les interactions actives*

2.2.1 *Echauffement des électrons*

Lorsqu'une onde radioélectrique traverse l'ionosphère, son champ électrique met en mouvement les électrons; leurs collisions avec les ions et les particules neutres met fin à leurs déplacements, mais l'onde qui était à l'origine de ces phénomènes a subi une absorption et par conséquent un affaiblissement.

L'énergie ainsi extraite de l'onde élève la température et la vitesse des électrons libres et cet échauffement ohmique du plasma augmente la fréquence des collisions des électrons, d'où un nouvel échauffement de ces derniers. De plus, on constate que, dans les régions inférieures de l'ionosphère, d'importants mécanismes de refroidissement associés à l'attachement et à la recombinaison des électrons dépendent de la température. Un échauffement ohmique suffisamment fort peut provoquer une augmentation considérable de la température et de la densité des électrons, particulièrement dans les régions D et E de l'ionosphère [Perkins et Roble, 1978; Tomko et autres, 1980]. Cet échauffement pourra ensuite affecter certains processus fondamentaux de l'ionosphère, comme le taux de recombinaison entre électrons et ions, les densités ionosphériques, ou provoquer des interactions non linéaires entre l'ionosphère et les microondes, engendrant de nouvelles perturbations du plasma ambiant. Toutes ces perturbations risquent d'avoir des effets sérieux sur les services de télécommunication existants.

L'échauffement ohmique étant inversement proportionnel au carré de la fréquence, on peut simuler expérimentalement celui qui résulterait d'une transmission SPS en ramenant à des valeurs normalisées à la fois la fréquence et la puissance de l'onde calorifique. D'après les récents résultats d'expériences de simulation de SPS quant à ces effets sur l'échauffement de l'ionosphère, il semblerait que, dans leur conception actuelle, les SPS n'auraient pas d'effets défavorables sur la performance de systèmes de télécommunications à ondes myriamétriques, kilométriques et hectométriques [Rush, 1981]. Il reste à en étudier les effets sur la propagation des ondes décamétriques et de fréquences plus élevées.

2.2.2 *Absorption*

L'augmentation de la fréquence des collisions entre électrons due à la propagation d'une onde électromagnétique à travers l'ionosphère a pour résultat d'augmenter l'absorption de toute autre onde se propageant à travers la même partie de l'ionosphère. Il importe donc que l'on examine dans quelle mesure une onde peut être affaiblie quand elle se propage à travers une région de l'ionosphère illuminée par le faisceau d'un SPS. Le calcul a montré que, dans une telle région, la fréquence des collisions peut s'élever dans des proportions notables, ce qui risque d'augmenter de façon correspondante l'absorption sans déviation d'une onde radioélectrique traversant cette région. Cependant, la zone dans laquelle cet effet se manifesterait serait relativement petite, aussi pense-t-on peu probable qu'une interruption significative des radiocommunications ionosphériques puisse en résulter.

2.2.3 *Irrégularités alignées selon les lignes de force du champ*

Un mécanisme plasma, lié à l'échauffement ohmique de l'ionosphère, est thermiquement autofocalisant. L'ionosphère est le siège de petites fluctuations naturelles de la densité électronique qui donnent lieu à des variations correspondantes de l'indice de réfraction du plasma. Ces variations ont pour effet qu'une onde électromagnétique traversant ce plasma subit de légères focalisations et défocalisations ainsi qu'une réfraction dans les régions où la densité électronique est abaissée. Dans le cas présent, en raison de l'augmentation du champ électrique, le plasma a tendance à s'éloigner des régions de focalisation, ce qui amplifie la perturbation initiale. Ce processus, dit d'autofocalisation, se poursuit jusqu'à ce que l'équilibre hydrodynamique soit atteint et il donne lieu à des irrégularités à grande échelle, d'une largeur d'environ 1 km, alignées dans la direction du champ géomagnétique.

On a observé la formation d'irrégularités de la densité électronique, ou «striation», au cours d'expériences sur les modifications de l'ionosphère faites lors de la dernière décennie [Utlaut, 1975]. Les résultats de ces expériences ont été examinés dans le Rapport 728, ainsi que les possibilités d'utiliser les modifications de l'ionosphère aux fins des télécommunications. Cependant, la région qui est le siège de ces modifications peut également se présenter comme la source de sérieux brouillages au détriment de services de radiocommunication jusque dans la gamme des ondes décimétriques, aussi importe-t-il de considérer les mécanismes tels que l'autofocalisation thermique comme une interaction possible de la transmission d'énergie par les satellites.

Pour que des striations bien définies se produisent dans l'ionisation de la région F, il faut que l'instabilité de l'autofocalisation thermique s'accroisse à un rythme suffisamment rapide et dans une étendue spatiale correspondante à la réalité. L'analyse du problème dans le cas du SPS fait ressortir que, pour un niveau de puissance donné, l'on peut prévoir une longueur d'ondes de striation pour laquelle l'accroissement de l'étendue spatiale est à son maximum. De plus, la configuration géométrique favorable à une croissance maximale est celle dans laquelle les striations sont alignées de telle sorte que les variations de la densité électronique se produisent dans une direction perpendiculaire au plan du champ géomagnétique et à l'axe du faisceau de microondes [Perkins et Goldman, 1981]. La largeur et la longueur de l'accroissement des striations sont fonction de l'angle formé par le faisceau du SPS et le champ géomagnétique. Pour la réception du faisceau à des latitudes moyennes, on prévoit des largeurs de striation de quelque 200 m, avec des longueurs d'accroissement d'environ 200 km. Il est possible que les émissions SPS produisent ces irrégularités sur un grand intervalle de latitudes; les travaux actuels visent à exprimer quantitativement et avec précision leur formation et leurs effets sur les services de télécommunications actuels.

D'après certaines indications théoriques, pour une longueur d'accroissement donnée, la puissance-seuil nécessaire pour déclencher l'instabilité de l'autofocalisation thermique est inversement proportionnelle au cube de la fréquence. Ainsi, par une réduction appropriée de la puissance et de la fréquence on peut simuler expérimentalement les conditions d'exploitation du SPS dont on prévoit qu'elles seront les causes d'instabilités. Il importe évidemment que l'on étudie à fond la question de la production éventuelle de l'autofocalisation pour les systèmes SPS.

Les scintillations satellite-sol observées par Basu et autres [1980] au cours d'expériences lors de simulation des conditions d'exploitation du SPS montrent que les effets d'instabilité d'autofocalisation peuvent jouer un rôle important dans l'exploitation de ces systèmes.

2.2.4 *Interactions du plasma*

En plus des irrégularités à grande échelle alignées selon les lignes de force du champ, on a observé, au cours des expériences d'échauffement de l'ionosphère par les ondes décamétriques, des striations du plasma à petite échelle. Cela a contribué à la découverte d'un nouveau mode de réaction du plasma dans lequel un battement entre deux ondes – l'onde d'excitation et une onde électrostatique de plasma – donne lieu à une onde de plasma à basse fréquence qui se déplace transversalement au champ géomagnétique et donne naissance à des structures de petites dimensions (environ 3 m) alignées selon les lignes de force du champ. Ces irrégularités donnent lieu à la diffusion d'ondes radioélectriques jusqu'aux ondes décimétriques ainsi que sur des fréquences qui diffèrent de celle du signal transmis d'une valeur égale à la fréquence d'échauffement. Cette diffusion dépend beaucoup moins des circonstances que celle due aux stries de grandes dimensions, car elle dépend peu de la géométrie du champ magnétique. La formation de ces stries de petites dimensions est donc encore une cause possible d'accroissement des brouillages et, par conséquent, d'interruption des services radioélectriques.

Il semble à première vue peu probable qu'une transmission SPS puisse donner lieu à des striations à petites échelles, car la fréquence des microondes est trop éloignée de celles des ondes électrostatiques de plasma pour donner naissance à la composante à basse fréquence nécessaire pour la formation des stries. Il convient néanmoins de poursuivre l'étude de ce phénomène dans le cas des transmissions SPS, et cela pour les raisons suivantes:

- Les striations de plasma à petite échelle peuvent être le résultat d'instabilités secondaires en présence d'irrégularités d'autofocalisation thermique et l'on étudie actuellement plusieurs mécanismes susceptibles d'expliquer leur production. Certains faits expérimentaux portent à croire qu'il existe une relation étroite entre les striations à petite et à grande échelle.
- Le faisceau à microondes du satellite SPS sera commandé par des informations déduites du signal pilote émis du sol et reçu par l'antenne du SPS. Le hasard peut faire que la différence de fréquence entre le signal pilote transmis sur le trajet montant et l'onde de transport d'énergie donne naissance à des réactions du plasma par battement avec une onde électrostatique et génération de structures de petites dimensions dont il a été question ci-dessus. On pourrait contourner cette difficulté en veillant à ce que la différence de fréquence dépasse toujours la fréquence de plasma maximale prévue, mais on doit quand même se rappeler que des effets analogues pourraient se produire si d'autres émissions faites sur des fréquences voisines de celle du SPS parvenaient dans la même région de l'ionosphère.
- Même en l'absence de striations de petites dimensions organisées, il peut se faire qu'une turbulence électrostatique à petite échelle dans un plasma produise de la diffusion et de la scintillation des ondes électromagnétiques, et il existe dans les plasmas de nombreux processus capables de déclencher localement de forts niveaux de turbulence. Ces interactions sont importantes à la fois pour le faisceau de transmission d'énergie et pour le signal pilote transmis du sol.

On est encore loin de tout savoir sur la façon dont sont engendrées les striations du plasma de petites dimensions. On espère que les expériences d'échauffement de l'ionosphère que l'on se propose de faire montreront parfaitement en quoi elles intéressent les transmissions du type SPS.

2.2.5 *Effets de la réalisation du système SPS sur l'ionosphère*

La réalisation de système SPS nécessitera de nombreux lancements de véhicules HLLV. Il est à prévoir que, du fait de la pénétration de produits d'échappement dans la région F, ces lancements entraîneront des appauvrissements de l'ionosphère en ions et en électrons. Aux altitudes de l'ordre de 200 km, les ions 0^+ normalement présents transfèrent leurs charges sur les produits de combustion H_2O, H_2 et CO_2, formant ainsi des ions polyatomiques qui se recombinent rapidement avec des électrons libres. Il y a ainsi un renforcement du taux de recombinaison entre électrons et ions, d'où l'appauvrissement en ions de la région F.

Plusieurs observations de ce phénomène ont déjà été faites à l'occasion de divers lancements de fusées. Après le lancement de Skylab-1 (mai 1973), on a constaté expérimentalement une réduction de quelque 50% du contenu électronique total. Cette chute de la densité électronique s'est étendue à toute une région d'environ 2000 km de diamètre et on a pu l'observer pendant environ 4 heures [Mendillo et autres 1975]. Des fluctuations de 5 à 10% de la densité électronique ont également été observées à la suite de lancements d'engins spatiaux; pendant les perturbations, on a observé des réflexions multiples des ondes décamétriques [Zasov et autres, 1977].

On prévoit d'autre part que les lancements des engins HLLV seront en outre accompagnés des phénomènes suivants: perturbations des profils de la densité électronique, des conductivités électriques et du couplage entre l'ionosphère et la magnétosphère ainsi qu'une augmentation de la traînée des satellites. Ces modifications pourraient influer défavorablement sur la performance de tous les systèmes de télécommunication exploités dans tout le spectre.

3. Effets sur les services existants

Les interactions ionosphériques décrites ci-dessus appartiennent à l'une des deux catégories suivantes:

a) Perturbations du faisceau SPS et de celui du signal pilote Terre-espace:
- réfraction par des gradients de la densité électronique;
- diffraction par des irrégularités de l'ionosphère d'origine naturelle.

b) Modifications de l'ionosphère:
- surcroît d'absorption,
- perturbation de l'équilibre thermique local de l'ionosphère, affectant à son tour d'autres mécanismes ionosphériques,
- diminution des densités ionosphériques,
- striations à grande échelle,
- déclenchement d'autres interactions de plasma donnant lieu à leur tour à la production de striations de petites dimensions.

Les deux catégories d'interaction ci-dessus entraîneraient des brouillages des services radioélectriques existants. Des brouillages dans la voie de fréquence égale à celle du SPS pourraient résulter de la diffusion du faisceau sur des irrégularités de l'ionosphère d'origine naturelle.

Ces irrégularités, dont on sait qu'elles provoquent la scintillation des ondes qui traversent l'ionosphère, pourraient être produites artificiellement par des mécanismes de la catégorie b) ci-dessus. Les liaisons à ondes hectométriques et décamétriques pourraient être directement affectées par l'augmentation de l'absorption dans la basse ionosphère et par la diminution des densités ionosphériques dans la région F. Des brouillages à large bande plus sérieux pourraient résulter de la diffusion par les ondes radioélectriques de striations d'origine artificielle, entraînant de graves interruptions de services de Terre assurés dans des bandes de fréquences inférieures à celles des ondes décimétriques ainsi que de certains services transionosphériques. Il est nécessaire que l'on ait une connaissance quantitative plus précise de ces phénomènes mais, auparavant et pour commencer, il importe que l'on acquière une connaissance bien meilleure des mécanismes qui s'y rapportent. Il faut que l'on puisse faire des expériences significatives dans lesquelles seront simulés des effets d'échauffement dû au transport d'énergie solaire par satellite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASU, S., JOHNSON, A. L., KLOBUCHAR, J. A. et RUSH, C. M. [1980] Preliminary results of scintillation measurements associated with ionospheric heating and possible implications for the Solar Power Satellite. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 609-612.

GLASER, P. E. [1977] The potential of satellite solar power. *Proc. IEEE*, Vol. 658, 1162-1176.

GRANT, W., RUSH, C. M. et MORRISON. E. [1980] Studies of the potential impact of the solar power systems on the ionospheric and telecommunications systems. Propagation effects in space/Earth paths, AGARD Conf. Proc. N° 284, 41-1 to 41-19, Technical Editing and Reproductions House, Londres, Royaume-Uni.

HUGHES, K. A. [1980] The interactions of a solar power satellite transmission with the ionosphere and troposphere. Propagation effects in space/Earth paths, AGARD Conf. Proc. N° 284, 38-1 to 38-7, Technical Editing and Reproductions House, Londres, Royaume-Uni.

MENDILLO, M., HAWKINS, G. S. et KLOBUCHAR, J. A. [1975] A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 2217-2228.

PERKINS, F. W. et GOLDMAN, M. V. [1981] Self-focusing of radio waves in an underdense ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, **A2**, 600-608.

PERKINS, F. W. et ROBLE, R. G. [1978] Ionospheric heating by radiowaves: predictions for Arecibo and the satellite power station. *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, 1611-1624.

RUSH, C. M. [1981] SPS Simulated effects of ionospheric heating on the performance of telecommunications systems: a review of experimental results. *Space Solar Power Rev.* **2**, 355-366.

TOMKO, A. A., FERRARO. A. J., LEE, H. S. et MITRA, A. P. [1980] A theoretical model of D-region ion chemistry modifications during high power radio wave heating. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 42, 275-285.

US DEPT. OF ENERGY [1980a] Program Assessment Report Statement of Findings: Satellite, Power, Systems, Concept Development and Evaluation Program, Office of Energy Research, DOE/ER-0085, 4-7.

US DEPT. OF ENERGY [1980b] Proceedings of the Workshop on the Modification of the Upper Atmosphere by Satellite Power System (SPS) Propulsion Effluents, Office of Energy Research, CONF-7906180.

US DEPT. OF ENERGY [1980c] Environmental Assessment for the Satellite Power System (SPS) Concept Development and Evaluation Program (CDEP) Office of Energy Research, DOE/ER-0069, 93-115.

UTLAUT, W. E. [1975] Ionospheric modification induced by high-power HF transmitters – A potential for extended range VHF-UHF communications and plasma physics research. *Proc. IEEE*, Vol. 63, 7, 1022-1043.

ZASOV, G. F., KARLOV, V. D., ROMANCHUK, T. Ye., SOLODOVNIKOV, G. K., TKACHEV, G. N. et TRUKHAN, M. G. [1977] Observations of disturbances in the lower ionosphere during Soyuz-Apollo experiments. *Geomag. i Aeronom.*, 17, 234-235.

RAPPORT 251-4

COMMUNICATIONS UTILISANT LA PROPAGATION PAR IMPULSIONS MÉTÉORIQUES

(Question 28/6)

(1959-1963-1966-1978-1982-1986)

1. Introduction

La diffusion par l'ionisation provoquée par les traînées météoriques constitue un moyen de communication en ondes décamétriques et métriques. On a pu exploiter des circuits de télécommunication bidirectionnels expérimentaux sur des fréquences comprises entre 30 et 100 MHz, à des distances allant jusqu'à 1300 km. Pour ces communications, on tire parti de crénaux de propagation créés par les traînées météoriques; comme valeur moyenne sur plusieurs minutes, on peut escompter des débits d'information allant jusqu'à 100 bauds.

Certaines techniques modernes de télécommunication, qui ont recours à des mini-ordinateurs pour effectuer des opérations interactives entre terminaux d'émission et de réception, ont rendu les communications par impulsions météoriques relativement plus intéressantes pour des applications spéciales dans lesquelles on peut tolérer des retards atteignant éventuellement quelques minutes. Parmi ces applications, on peut citer la transmission intermittente d'informations d'un grand nombre de stations éloignées vers une station centrale, les transmissions à destination et en provenance de terminaux mobiles, enfin les communications sur ligne de service pour des liaisons techniques à l'appui de circuits à ondes courtes de longueur moyenne.

La première fois que l'on s'aperçut que des météores étaient capables de provoquer une ionisation dans la haute atmosphère, c'est lorsqu'on observa une corrélation entre la propagation de signaux en ondes décamétriques à travers l'Atlantique et des averses de météores [Pickard, 1931]. En 1943, une surveillance systématique de stations à ondes métriques éloignées effectuée aux Etats-Unis montra que l'on pouvait parfois recevoir, à des distances allant jusqu'à 2200 km, des paquets de signaux exempts de distorsion [Allen, 1948]. Ces paquets duraient jusqu'à une seconde et leur fréquence d'apparition présentait une variation diurne en corrélation avec ce que l'on savait des météores visuels et avec les estimations théoriques s'y rapportant.

Dans des expériences ultérieures, on recourut aussi bien à des techniques de rétrodiffusion que de prodiffusion. Aux résultats des études théoriques était venue s'ajouter, dès le milieu des années 50, une importante masse de renseignements pratiques sur la propagation par impulsions météoriques. Cette activité a été résumée dans un important ensemble d'articles comportant la description de deux systèmes de communication expérimentaux [Forsyth et autres, 1957; Vincent et autres, 1957].

Au cours de la décennie suivante, on fit des travaux qui permirent de mieux évaluer les performances probables d'un système de communication utilisant les impulsions météoriques. L'état de la question fut résumé dans un livre [McKinley, 1961] et dans un article tout à fait complet [Sugar, 1964]. Avec un système expérimental relativement compliqué (répétition automatique de l'émission en présence d'erreurs (ARQ) et réception en diversité), on peut faire des transmissions avec un débit minimal de 50 bauds sur un circuit de 1000 km [Bartholomé et Vogt, 1968].

Des essais effectués au Canada montrèrent que, même à des fréquences aussi élevées que 104 MHz, la propagation par impulsions météoriques n'était pas, contrairement à ce qu'on avait espéré, entièrement exempte d'interruptions complètes dans les régions arctiques [Maynard, 1968]. Cependant, à des latitudes plus faibles, en Norvège, on ne constata aucune difficulté de ce genre [Ince et autres, 1978]. Ces différences peuvent être liées à l'occurence d'éruptions solaires exceptionnellement intenses pendant la période de forte activité solaire au cours de laquelle avait été effectuée la première série d'essais. Etudiant le système de communication par impulsions

météoriques de l'Alaska, Santeford [1976] a donné des résultats d'essais en hiver qui montrent que les effets de trajets multiples dus à l'ionisation aurorale s'étendent sur environ 8% du temps. Ces effets de trajets multiples étaient corrélés avec de grandes perturbations magnétiques. Maintenant, lorsqu'on a recours aux liaisons par impulsions météoriques, c'est plutôt quand on a besoin de circuits sur lesquels les communications ne sont qu'occasionnelles: émission d'informations météorologiques [Smith, 1978], émission de signaux horaires [Minullin et autres, 1971] ou ligne de service [Brown et Williams, 1978]. On n'a pas encore tiré parti de la largeur de bande de cohérence exceptionnellement grande des signaux propagés grâce aux impulsions météoriques [Akram et autres, 1977].

Haakinson [1983] a élaboré un modèle de communications utilisant la propagation par impulsions météoriques, qui permet de prévoir la fiabilité d'un tel système. La prévision des temps d'attente nécessaires pour effectuer complètement la transmission des messages d'une station centrale vers une station éloignée se fait en fonction des paramètres du système, de la distance séparant les stations, de l'heure et de la saison.

Dans le présent Rapport, on trouve un résumé des principaux facteurs qui déterminent les caractéristiques de la diffusion météorique et qu'il convient de prendre en considération lorsque l'on fait le projet d'un système de communication mettant à profit ce mécanisme de propagation.

2. Distribution des météores

A certaines époques de l'année, les météores se manifestent sous forme d'essaims qui peuvent être abondants pendant des durées de quelques heures; il y a d'autre part un fond continu de météores qui arrivent sur la Terre en provenance de toutes les directions et seuls ces météores sporadiques sont à prendre en considération lorsque l'on planifie des systèmes de communication.

La distribution des météores sporadiques en fonction de leur masse est la suivante: le nombre de ceux dont la masse dépasse une certaine valeur est à peu près inversement proportionnel à cette valeur. On observe des météores dans toutes les parties du monde et à toute heure, mais les renseignements statistiques que l'on possède sur leur distribution géographique et sur les directions de leurs traînées sont incomplets.

L'observation et la théorie permettent d'obtenir une estimation du nombre des météores qui arrivent dans l'atmosphère [Eshleman et Manning, 1954]. Le flux annuel moyen de météores tombant sur une surface unitaire et donnant lieu à une densité linéique d'électrons q supérieures à un certain seuil q_0 (nombre d'électrons par mètre) est donné par:

$$I(q > q_0) = \frac{160}{q_0} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

On sait [Manning et Eshleman, 1969] qu'aux latitudes moyennes, le taux horaire des météores sporadiques présente une variation diurne sensiblement sinusoïdale, le maximum ayant lieu à 06 h 00 (heure locale) et le minimum à 18 h 00 (heure locale). Le minimum et le maximum sont en moyenne dans un rapport d'environ 1 à 4. Il existe aussi une variation saisonnière d'importance comparable, avec un mimimum en février et un maximum en juillet [Sites, 1978]. D'un jour à l'autre, le taux horaire des météores sporadiques comme des averses météoriques présente une variabilité extrême. Certaines statistiques combinées du nombre journalier de deux types de météores ont été présentées par Millman [1978].

3. Emplacement des régions où la diffusion est optimale

Les propriétés diffusantes des traînées rectilignes d'ionisation météorique sont essentiellement des cas d'espèce. Pour que cette diffusion soit utilisable, il faut que la traînée ionisée satisfasse à une condition de réflexion spéculaire, ce qui exige qu'elle soit tangente à un ellipsoïde allongé dont les foyers se trouvent à l'émetteur et au récepteur (voir Fig. 1). On estime à 5%, dans la région du ciel la plus utile, le pourcentage des traînées de météores incidents que leur orientation rend utilisable [Eshleman et Manning, 1954]. La Fig. 2 fait connaître ce pourcentage dans l'hypothèse où la distance entre les deux extrémités de la liaison est de 1000 km. On peut voir que les régions optimales de diffusion se trouvent à une centaine de kilomètres de chaque côté du grand cercle reliant l'émetteur et le récepteur, quelle que soit la longueur du trajet.

Cette particularité, jointe au fait que les traînées se situent surtout entre 90 et 110 km de hauteur, permet de situer les deux régions de «points chauds» en direction desquelles il convient que les antennes soient toutes deux pointées. L'importance relative des deux «points chauds» varie selon l'heure du jour et dépend de l'orientation du trajet [Eshleman et Manning, 1954]. Les antennes utilisées en pratique ont en général des faisceaux suffisamment larges pour couvrir les deux «points chauds»; il en résulte que leurs performances ne sont pas optimales, mais qu'en revanche il n'est pas nécessaire d'imposer un balancement aux faisceaux des antennes. On a cependant mis à l'essai des systèmes à faisceau dédoublé comportant un zéro dans la direction du grand cercle [Davis et autres, 1957].

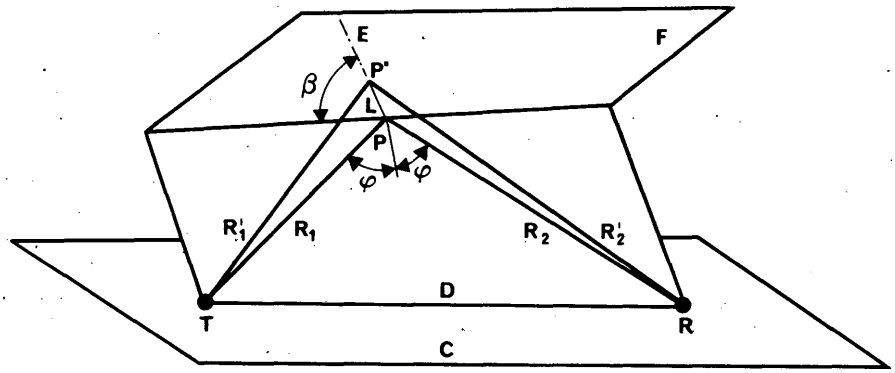


FIGURE 1 – *Trajet du rayon dans le cas de la propagation par impulsions météoriques*

C: surface de la Terre
D: plan de propagation
E: traînée météorique
F: plan tangent
β: angle de l'axe de la traînée et du plan de propagation
T: émetteur
R: récepteur
(Pour les symboles L, P, P', R_1, R_2, R'_1, R'_2 et φ voir le § 5)

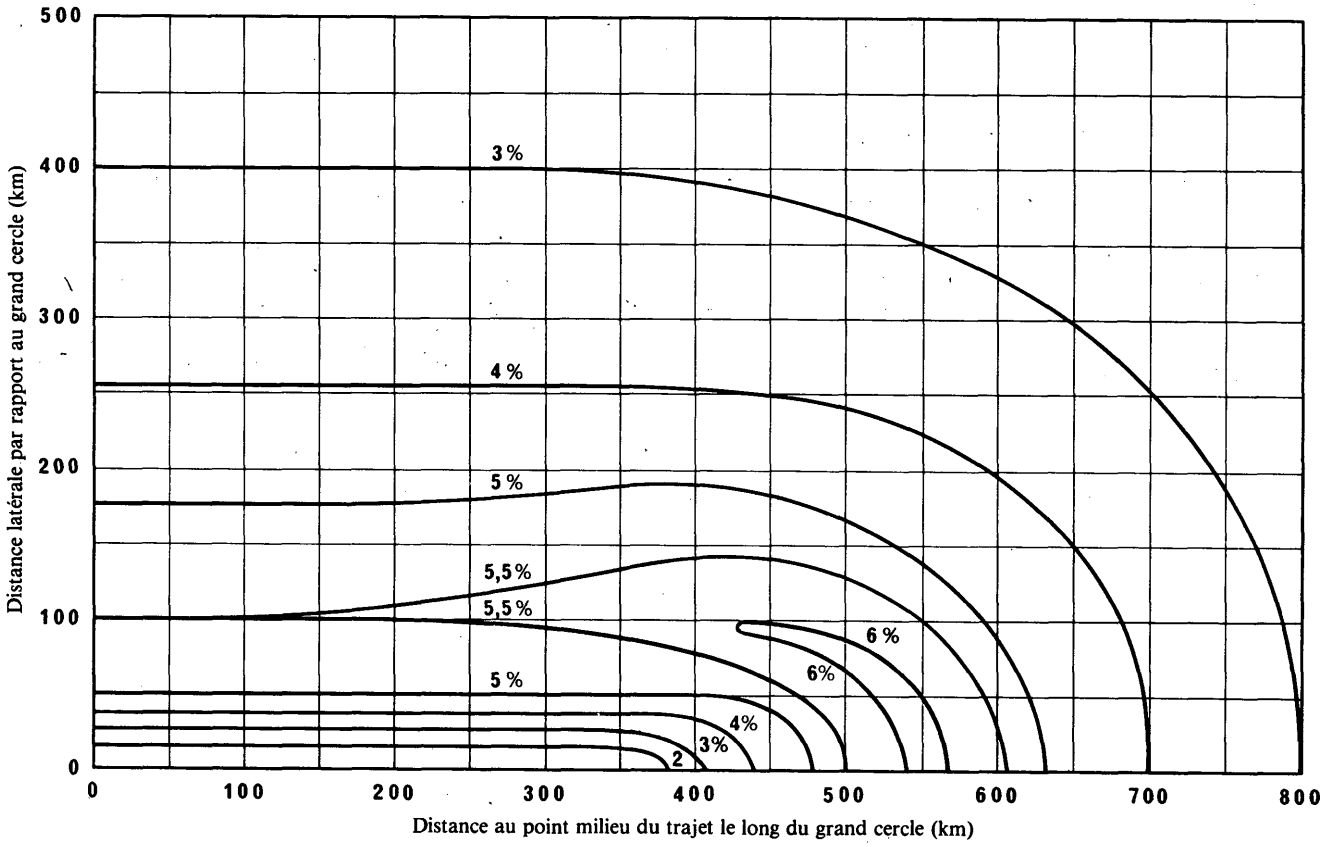


FIGURE 2 – *Pourcentage estimé du nombre des trajets utiles en fonction de l'emplacement où a lieu la diffusion, pour une distance de 1000 km entre les terminaux [Eshleman et Manning, 1954]*

4. Traînées de faible ou de forte densité

Selon l'intensité de l'ionisation qu'elles produisent, on peut classer les traînées météoriques en traînées de faible densité et en traînées de forte densité. Pour calculer l'amplitude des signaux diffusés par une traînée de faible densité, on additionne les champs de diffusion produits par chaque électron individuellement. Les traînées de forte densité sont celles pour lesquelles le couplage entre les électrons ne peut pas être négligé; dans ce cas on calcule les propriétés réfléchissantes comme si la traînée était un long cylindre métallique. La démarcation entre les deux cas se fait pour une densité linéique d'environ 2×10^{14} électrons par mètre. Aux fréquences utilisées dans la pratique, les échos dus aux traînées de faible densité présentent un départ abrupt suivi d'une décroissance exponentielle, alors que ceux qui sont dus aux traînées de forte densité ont des enveloppes plus arrondies et sont de plus longue durée [Sugar, 1964]. La proportion des deux sortes d'écho dépend de la sensibilité du système.

La densité électronique linéique étant représentée par q, les amplitudes de crête des réflexions sur les traînées de faible et de forte densité varient respectivement comme q et comme $q^{1/4}$. Etant donné que q est proportionnel à la masse du météore et que le taux d'incidence des météores sporadiques de masse supérieure à une valeur donnée est à peu près inversement proportionnel à cette valeur, le nombre N des signaux observés pendant une durée donnée et dont l'amplitude de crête est supérieure à un certain niveau A sera:

pour les traînées de faible densité: $N \sim A^{-1}$ (2)

pour les traînées de forte densité: $N \sim A^{-4}$ (3)

La fréquence d'occurence des réflexions en fonction de l'amplitude des signaux dépend donc de la sensibilité du système. Un résultat expérimental fréquemment obtenu avec les systèmes utilisés jusqu'ici est que N est proportionnel à $A^{-1,2}$, ce qui prouve que les échos proviennent surtout de traînées de faible densité. Ce même résultat peut s'exprimer par la formule:

$$D_C \sim p_R{}^{-0,6} \tag{4}$$

dans laquelle:

D_C : pourcentage du temps pendant lequel le seuil A est dépassé et

p_R : puissance reçue correspondant à ce même seuil.

On peut encore écrire:

$$D_C \sim p_T{}^{0,6} \tag{5}$$

où

p_T : puissance de l'émetteur.

5. Longueur équivalente, hauteur moyenne et rayon des traînées météoriques

Considérons la Fig. 1 qui représente la géométrie du trajet d'un rayon transmis par propagation météorique. T représente l'émetteur, R le récepteur, P le point de réflexion spéculaire et P' un point situé plus loin sur la traînée et tel que le trajet $R'_1 + R'_2$ soit supérieur d'une demi-longueur d'onde au trajet $R_1 + R_2$. Le segment PP', de longueur L, est donc tout entier dans la zone principale de Fresnel et la longueur totale de la traînée contenue à l'intérieur de cette zone est $2L$. A la condition que R_1 et R_2 soient beaucoup plus grands que L, on a:

$$L = \left[\frac{\lambda R_1 R_2}{(R_1 + R_2)\,(1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \beta)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

formule dans laquelle:

φ : angle d'incidence,

β : angle que fait l'axe de la traînée avec le plan de propagation TPR,

et

λ : longueur d'onde.

Pour évaluer la section droite de la diffusion de la traînée, on fait habituellement deux hypothèses; d'une part que, par suite de la diffusion ambipolaire, la densité radiale des électrons a une distribution gaussienne, d'autre part que la densité volumique est réduite alors que la densité linéique reste constante. Ces hypothèses conduisent à la formule (7) qui exprime la densité volumique N_v, (nombre d'électrons par m^3) en fonction du rayon r et du temps t écoulé depuis l'instant de la formation:

$$N_v(r.t) = \frac{q}{\pi(4Dt + r_0{}^2)} \exp\left[\frac{-r^2}{(4Dt + r_0{}^2)}\right] \tag{7}$$

Dans cette formule:

q : densité linéique (nombre d'électrons par mètre),

D : coefficient de diffusion ambipolaire, en m^2/s,

et

r_0 : rayon initial de la traînée, en mètres.

D et r_0 sont très nettement fonctions de l'altitude. Des résultats expérimentaux [Greenhow et Hall, 1960] ont permis d'aboutir à la formule empirique suivante qui relie l'altitude moyenne de la traînée à la fréquence (voir le § 8):

$$h = -17 \log f + 124 \tag{8}$$

où

h : altitude moyenne de la traînée (km)

et

f: fréquence de l'onde (MHz).

Bien que h soit fonction, non seulement de f, mais encore d'autres paramètres, la formule (8) donne une bonne approximation.

Pour la relation entre r_0 et h, on a établi diverses relations empiriques. Un compromis trouvé par Brown et Williams [1978] est le suivant:

$$\log r_0 = 0{,}035\ h - 3{,}45 \tag{9}$$

6. Constante de diffusion ambipolaire

Une bonne approximation de cette constante est donnée par l'expression suivante [Greenhow et Neufeld, 1955; McKinley, 1961].

$$\log D = 0{,}067\ h - 5{,}6 \tag{10}$$

D'après Greenhow et Hall [1960], le rapport de D à la vitesse V du météore, exprimée en m/s, rapport qui intervient dans l'évaluation de la puissance reçue, peut se représenter approximativement par:

$$D/V = [0{,}0015\ h + 0{,}035 + 0{,}0013\ (h - 90)^2]\ 10^{-3} \tag{11}$$

7. Puissance reçue

7.1 *Traînées de faible densité*

D'après McKinley [1961] et Sugar [1964], la puissance reçue $p_R(t)$ après diffusion sur une traînée de faible densité est, aux fréquences utilisées dans la pratique, de:

$$p_R(t) = \frac{p_T\ g_T\ g_R\ \lambda^2\ \sigma\ a_1\ a_2(t)\ a_2(t_0)\ a_3}{64\pi^3\ R_1^2\ R_2^2} \tag{12}$$

formule dans laquelle:

λ : longueur d'onde (m),

σ : surface efficace de diffusion de la traînée (m^2),

a_1 : facteur d'affaiblissement dû au fait que le rayon initial de la traînée est fini,

$a_2(t)$: facteur d'affaiblissement dû à la diffusion de la traînée,

a_3 : facteur d'affaiblissement dû à l'absorption ionosphérique,

t : temps mesuré à partir de l'instant de la formation complète de la première zone de Fresnel (s),

t_0 : moitié du temps mis par le météore pour traverser cette zone,

p_T : puissance de l'émetteur (W),

$p_R(t)$: puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception (W),

g_T : gain de l'antenne d'émission par rapport à une antenne isotrope en espace libre,

g_R : gain de l'antenne de réception par rapport à une antenne isotrope en espace libre.

Les antennes d'émission et de réception sont supposées sans pertes.

La surface σ est donnée par:

$$\sigma = 4\,\pi r_e^{\,2}\, q^2\, L^2 \sin^2 \alpha \tag{13}$$

formule dans laquelle:

r_e : rayon apparent de l'électron ($2{,}8 \times 10^{-15}$ m) et

α : angle que fait le vecteur champ électrique au point d'incidence sur la traînée avec la direction PR.

L^2 étant proportionnel à λ, la surface σ lui est également proportionnelle, de sorte que la puissance reçue, pour le cas d'une traînée de faible densité, varie comme λ^3. La polarisation horizontale étant normalement utilisée aux deux extrémités, le facteur $\sin^2 \alpha$ de la formule (13) est sensiblement égal à 1 aux deux «points chauds».

Le facteur d'affaiblissement a_1 est donné par:

$$a_1 = \exp\left[-\frac{8\pi^2\, r_0^{\,2}}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right] \tag{14}$$

Il représente l'affaiblissement créé par les interférences entre les rayonnements des électrons chaque fois que l'épaisseur de la traînée lors de sa formation est du même ordre que la longueur d'onde.

Le facteur d'affaiblissement $a_2(t)$ tient compte de l'augmentation du rayon de la traînée provoquée par la diffusion ambipolaire. On peut le représenter par:

$$a_2(t) = \exp\left[-\frac{32\pi^2\, Dt}{\lambda^2 \sec^2 \varphi}\right] \tag{15}$$

L'augmentation de ce rayon peut être appréciable, même pendant une durée aussi courte que celle qui est nécessaire pour la formation de la traînée. L'effet total, pour ce qui est de la puissance réfléchie, est le même que celui que l'on constaterait si la portion de la traînée contenue à l'intérieur de la première zone de Fresnel s'était en tous ses points étendue dans les mêmes proportions qu'en son point milieu. Cette portion de la traînée étant de longueur 2 L, le rayon au point milieu est celui que l'on observe après un délai de (L/V) secondes. Appelant ce délai t_0, pour les traînées voisines du point milieu ($R_1 \approx R_2 = R$), on a:

– pour les traînées perpendiculaires au plan de propagation ($\beta = 90°$):

$$t_0 \simeq \left(\frac{\lambda R}{2V^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{16}$$

– pour les traînées situées dans le plan de propagation ($\beta = 0°$):

$$t_0 \simeq \left(\frac{\lambda R}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\sec \varphi}{V} \tag{17}$$

En portant dans la formule (15) la valeur de t_0 fournie par la formule (16), on obtient la formule:

$$a_2(t_0) = \exp\left[-\frac{32\pi^2}{\lambda^{3/2}}\left(\frac{D}{V}\right)\left(\frac{R}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sec^2 \varphi}\right] \tag{18}$$

valable pour le cas où $\beta = 90°$. Pour le cas où $\beta = 0°$, il convient de multiplier l'expression entre crochets de la formule précédente par $\sec \varphi$.

$a_2(t)$ est le seul terme qui dépende du temps. Il fait connaître la durée d'extinction du signal réfléchi. Si l'on définit une constante de temps T_{un} comme étant le délai au bout duquel la puissance reçue a diminué dans le rapport de 1 à e^2 (c'est-à-dire de 8,7 dB), on trouve:

$$T_{un} = \frac{\lambda^2 \sec^2 \varphi}{16\pi^2\, D} \tag{19}$$

En incidence rasante, le facteur $\sec^2 \varphi$ est important et il en est par conséquent de même pour la constante de durée d'écho. Cette constante est d'ailleurs plus élevée si l'on utilise des fréquences plus basses.

7.2 *Traînées de forte densité*

La formule valable dans ce cas est généralement fondée sur l'hypothèse de la réflexion sur un cylindre métallique dont la surface coïncide avec la région pour laquelle la constante diélectrique est nulle [McKinley, 1961; Sugar, 1964]. En règle générale, on néglige l'effet de la réfraction dans la portion de faible densité électronique de la traînée. Comme dans le cas d'une traînée de faible densité, la puissance reçue varie comme λ^3 et la durée de l'écho comme λ^2. Cependant, la puissance maximale reçue n'est plus proportionnelle à q^2, mais à $q^{1/2}$. L'augmentation de la puissance du signal reçu avec l'intensité de l'ionisation est donc plus faible.

7.3 *Valeurs typiques de l'affaiblissement de transmission de référence*

La plupart des cas pratiques de transmission par impulsions météoriques font intervenir des traînées de faible densité, aussi les formules relatives au cas des traînées de forte densité sont-elles de moindre importance. On obtient des estimations satisfaisantes des performances en utilisant les formules relatives au cas de la faible densité et en admettant que les valeurs de q sont comprises entre 10^{13} et 10^{14} électrons par mètre, selon les paramètres du système.

Les courbes représentant l'affaiblissement de transmission de référence déduites de la formule (12) pour $q = 10^{14}$ sont données sur la Fig. 3. L'angle β pouvant prendre n'importe quelle valeur entre 0° et 90°, il n'a été tenu compte que de ces deux cas extrêmes. On voit clairement qu'aux fréquences les plus basses l'affaiblissement de transmission de référence est plus avantageux. Pour tracer les courbes, on a pris pour altitudes moyennes des météores des valeurs déduites de la formule (8). Il convient de noter que la prévision des performances d'un système dépend de façon critique de la valeur admise pour l'altitude.

8. Altitude maximale des échos dans le cas des traînées de faible densité

Les paramètres D et r_0 augmentent tous deux avec l'altitude. En conséquence, les influences des facteurs d'affaiblissement a_1 et $a_2(t_0)$ se combinent de manière à réduire le nombre des traînées de faible densité qui se produisent au voisinage du sommet de la région météorique utile aux fins des communications: d'où un effet de «plafond» des échos dans le cas des traînées de faible densité. On a constaté l'existence de restrictions du même genre dans le cas monostatique. La Fig. 4 représente la distribution mesurée des altitudes des échos sur des traînées de faible densité pour diverses fréquences de radar [McKinley, 1961]. On voit que l'altitude minimale pour laquelle de tels échos se manifestent est de 85 km et que la distribution de leur altitude est sensiblement gaussienne à toute fréquence. Milsom [1979] a donné une méthode qui permet d'estimer le nombre des échos météoriques décelables d'après une évaluation du plafond des échos dont il vient d'être question.

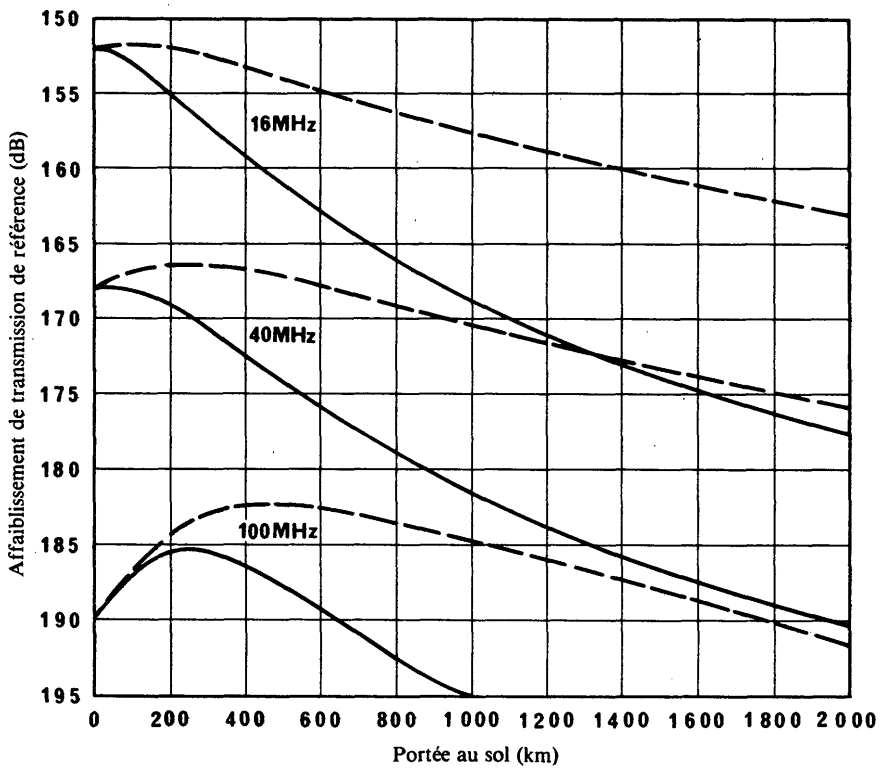


FIGURE 3 – *Affaiblissement de transmission de référence pour le cas de traînées météoriques de faible densité, donné par la formule (13), pour $q = 10^{14}$ électrons/m et une polarisation horizontale*

——— traînées perpendiculaires au plan de propagation ($\beta = 90°$)

— — traînées dans le plan de propagation ($\beta = 0°$)

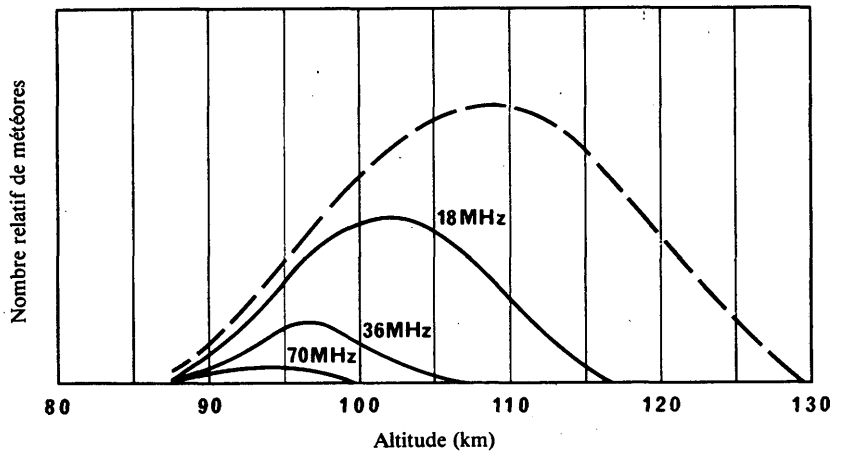


FIGURE 4 – *Distribution, en fonction de la hauteur, des traînées météoriques de faible densité donnant lieu à des échos aux fréquences 18, 36 et 70 MHz* [McKinley, 1961]

—— —— distribution estimée des traînées météoriques

9. Influence de la longueur d'onde sur le facteur d'utilisation de l'information

L'influence de la longueur d'onde sur les facteurs $p_{R_{max}}$ (valeur maximale de la puissance reçue p_R) et D_C est telle, d'après la formule (12), que, pour des valeurs fixes de la puissance de l'émetteur et des gains des antennes:

$$p_{R_{max}} \sim \lambda^3 \tag{20}$$

Cette formule est valable pour les traînées de faible comme de forte densité. L'influence de la longueur d'onde sur D_C dépend de la fréquence d'apparition relative des deux sortes de traînées. Si l'on admet une formule intermédiaire entre celles de (2) et de (3), à savoir $N \sim A^{-2}$, on a $N \sim p_{R_{max}}{}^{-1}$ et il en résulte que:

$$D_C \sim p_{R_{max}} T_{un} \sim \lambda^5 \tag{21}$$

Dans les lieux de réception très calmes, le bruit prédominant aux fréquences supérieures à 25 MHz est le bruit cosmique, dont l'intensité varie comme $\lambda^{2,3}$. Il en résulte que le facteur d'utilisation de l'information I_C, pour une largeur de bande donnée, (pourcentage du temps pour lequel une valeur donnée du rapport signal/bruit est dépassée) varie en fonction de la longueur d'onde selon:

$$I_C \sim \lambda^{2,7} \tag{22}$$

On trouvera dans un article d'Eshleman [1957], une discussion plus poussée de cette relation selon diverses hypothèses. La puissance de bruit étant proportionnelle à la largeur de bande B, l'emploi de la formule (4) conduit à:

$$I_C \sim B^{-0,6} \tag{23}$$

La capacité moyenne de la voie (C) est le produit du débit de données par le facteur I_C. Le premier de ces facteurs peut être considéré comme proportionnel à la largeur de bande, aussi peut-on écrire:

$$C \sim B^{0,4} \tag{24}$$

Pour que le transfert d'information puisse être maximal, il faut que la largeur de bande soit aussi grande que possible.

Toute question de disponibilité de largeur de bande mise à part, le facteur I_C se trouve réduit pour la raison que le bruit est plus intense quand la bande est plus large, si bien que le rapport signal/bruit atteint plus difficilement la valeur nécessaire; ces faits entraînent à leur tour un allongement du temps nécessaire pour transmettre un message. On en arrive d'autre part à un point où le fonctionnement du système en vient à reposer sur des traînées de forte densité, cas dans lequel la formule (4) n'est plus valable, comme on peut le voir en comparant les exposants de N des formules (2) et (3). Lorsque l'exposant de la puissance de p_R à laquelle D_C est proportionnel devient inférieur à -1, on n'a plus avantage à augmenter le débit de données [Montgomery et Sugar, 1957]. On peut noter que l'exposant dont il vient d'être question est susceptible de descendre au-dessous de -1 pour les fréquences inférieures à 40 MHz, du fait que les signaux transmis par diffusion ionosphérique masquent les signaux, plus faibles, transmis par impulsions météoriques.

Il est peu probable que la largeur de bande utilisable soit limitée par la largeur de bande de cohérence, puisque celle-ci est de l'ordre de plusieurs MHz pendant la principale partie de l'impulsion [Akram et autres, 1977]. Même pendant les queues des échos, où il y a des évanouissements dus au cisaillement du vent, la largeur de bande de cohérence est de quelques centaines de kilohertz.

10. Considérations pratiques pour le choix de la fréquence

Le choix de la fréquence dans un système de communications par impulsions météoriques est restreint par plusieurs facteurs. Premièrement, l'équation (22) a montré que le facteur d'utilisation de l'information augmente quand la fréquence diminue. Deuxièmement, en raison du grand affaiblissement de trajet subi par les signaux de transmission par impulsions météoriques, il est nécessaire de maintenir le niveau des signaux brouilleurs à une valeur minimale. En conséquence, la fréquence de fonctionnement doit être supérieure à la fréquence de propagation des modes ionosphériques normaux. Troisièmement, l'absorption doit être réduite à un minimum, ce qui impose également l'emploi d'une fréquence aussi élevée que possible. Ceci concerne particulièrement les systèmes exploités à des latitudes élevées où l'absorption aurorale et l'absorption dans la calotte polaire peuvent atténuer et même absorber en totalité le signal lorsque la fréquence utilisée est trop basse [Maynard, 1968]. Enfin, Cannon [1986] a montré que, à certains moments, la rotation de Faraday subie par des signaux de communication par impulsions météoriques (signaux à polarisation rectiligne) réduit considérablement la capacité des liaisons de communications pour les fréquences inférieures à 40 MHz environ. On voit immédiatement que la première contrainte est contradictoire avec les trois dernières: lorsqu'il choisit sa fréquence, le concepteur du système doit donc apprécier quels poids appliquer à chacune des quatre contraintes.

11. Effets Doppler

Les réflexions sur la tête d'une traînée météorique peuvent donner lieu à des décalages de fréquence par effet Doppler qui risquent de s'étendre dans toute la largeur de la bande des audiofréquences. Le décalage Doppler provoqué par une traînée météorique est la conséquence de vents ionosphériques; il pourrait être de l'ordre de 20 Hz à la fréquence de 40 MHz [Millman, 1978].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKRAM, F., SHEIKH, N. M., JAVED, A. et GROSSI, M. D. [1977] Impulse response of a meteor-burst communications channel determined by ray-tracing techniques. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-25, 467-470.

ALLEN, E. W. Jr. [1948] Reflections of very-high frequency radio waves from meteoric ionization. *Proc. IRE*, Vol. 38, 346-352.

BARTHOLOMÉ, P. J. et VOGT, I. [1968] COMET – A new meteor-burst system incorporating ARQ and diversity reception. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-16, 268-278.

BROWN, D. W. et WILLIAMS. H. P. [1978] The performance of meteor-burst-communications at different frequencies. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications.* Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 24-1 à 24-26.

CANNON, P. S. [1986] Polarization rotation in meteor burst communication systems. *Radio Sci.*, Vol. 21, 3, 500-510.

DAVIS, G. W. L., GLADYS, S. J., LANG, G. R., LUKE, L. M. et TAYLOR, M. K. [1957] The Canadian «JANET» system. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1666-1678.

ESHLEMAN, V. R. [1957] On the wavelength dependence of the information capacity of meteor-burst propagation. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1710-1717.

ESHLEMAN, V. R. et MANNING, L. A. [1954] Radio communication by scattering from meteoric ionization. *Proc. IRE*, Vol. 42, 530-536.

FORSYTH, P. A., VOGAN, E. L., HANSEN, D. R. et HINES, C. O. [1957] The principles of JANET – a meteor-burst communication system. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1642-1657.

GREENHOW, J. S. et HALL, J. E. [1960] The importance of initial trail radius on the apparent height and number distributions of meteor echoes. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, Vol. 121, 183-196.

GREENHOW, J. S. et NEUFELD, E. L. [1955] The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 6, 133-140.

HAAKINSON, E. J. [1983] Meteor burst communications model, NTIA Rep. 83-116, PB 83-194134. US Dept. of Commerce, Office of Telecommunications, Institute for Telecommunication Sciences, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.

INCE, A. N., VOGT, I. M. et WILLIAMS, H. P. [1978] A review of scatter communications. AGARD Conf. Proc. No. 244, *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*, 21-1 to 21-31. Ed. A. N. Ince. NASA Accession No. N79-10299. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

MANNING, L. A. et ESHELMAN, V. R. [1959] Meteors in the ionosphere. *Proc. IRE*, Vol. 47, 186-199.

MAYNARD, L. A. [1968] Meteor-burst communications in the Arctic. *Ionospheric Radio Propagation*, 165-173, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

McKINLEY, D. W. R. [1961] *Meteor Science and Engineering*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

MILLMAN, G. H. [1978] HF Scatter from overdense trails. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*. Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 6-1 à 6-14.

MILSON, J. D. [1979] Some aspects of meteor-burst communication system design. Marconi Survey Series, 79/9A.

MINULLIN, R. G., PALII, G. N., SIDOROV, V. V., SUKHOTSKII, A. V. et IVANOVA, Yu. D. [1971] Time measurements – locking into the state standard of time by using reflections from meteors. 1971 Consultants Bureau, Plenum Publishing Corp., New York. Traduit de *Izmeritelnaya Tekhnika*, **1**, 22-24.

MONTGOMERY, G. F. et SUGAR, G. R. [1957] The utility of meteor-bursts for intermittent radio communication. Proc. IRE, Vol. 45, 1684-1693.

PICKARD, G. W. [1931] A note on the relation of meteor showers and radio reception. *Proc. IRE*, Vol. 19, 1166-1170.

SANTEFORD, H. S. [1976] Meteor burst communication system: Alaska winter field test program, NOAA Tech. Memo NWS-Hydro-30, PB-260 449/4. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.

SITES, F. J. [1978] Communications via meteor trails. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*. Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 25-1 à 25-21.

SMITH, H. C. [1978] Meteor-burst data communication system. 28th Annual Conference of the IEEE Vehicular Technology Society, 22-24 March, Denver, Colo., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, 497-502.

SUGAR, G. R. [1964] Radio propagation by reflection from meteor trails. *Proc. IEEE*, Vol. 52, 116-136.

VINCENT, W. R., WOLFRAM, R. T., SIFFORD, B. M., JAYE, W. E. et PETERSON, A. M. [1957] A meteor-burst system for extended range VHF Communications. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1693-1700.

RAPPORT 260-3

PROPAGATION PAR DIFFUSION IONOSPHÉRIQUE

(Question 28/6)

(1956-1959-1963-1966-1970-1978)

Le mode de propagation par diffusion ionosphérique est utilisé pour communiquer à des distances de 800 à 2000 km en utilisant la diffusion par irrégularités ionosphériques à une altitude d'environ 85 km. Les fréquences de fonctionnement sont de l'ordre de 30 à 60 MHz. La limite inférieure est déterminée par l'absorption au cours des PIDB et des phénomènes d'absorption dans la calotte polaire ainsi que par la nécessité d'éviter des signaux se propageant selon le mode normal par la couche F2 et par diffusion latérale.

La limite supérieure de la gamme de fréquences considérée dépend principalement de certains facteurs d'ordre économique. On peut considérer, à titre d'indication, que les champs varient en raison inverse de la puissance 7,5 de la fréquence utilisée pour des antennes homothétiques de dimensions proportionnelles à la longueur d'onde et pour une même puissance d'entrée, tandis que l'intensité du bruit cosmique varie en raison inverse de la puissance 2,5 de la fréquence; on peut donc admettre que le rapport signal/bruit varie sensiblement en raison inverse de la puissance 5 de cette même fréquence. Compte tenu de cette variation du rapport signal/bruit en fonction de la fréquence, et dans l'hypothèse de l'utilisation d'antennes homothétiques, il faut, pour obtenir le même rapport signal/bruit, une puissance d'émission dont le niveau à 60 MHz soit supérieur de 15 dB au niveau à 30 MHz.

S'il est faible par rapport aux modes ionosphériques normaux, le signal est persistant (dans la plupart des régions du monde); entre 1950 et 1970, on a utilisé des systèmes de diffusion ionosphérique à grande puissance pour obtenir un trafic téléphonique et de transmission de données de haute fiabilité. Les systèmes de communication utilisant la propagation par diffusion ionosphérique sont rarement utilisés de nos jours; de ce fait, l'analyse assez détaillée contenue dans les versions précédentes du présent Rapport (1956-1974) a été abrégée dans le présent document après la XIV^{e} Assemblée plénière, Kyoto, 1978. La bibliographie donne parmi les références du texte précédent, la liste des ouvrages qu'il est aisé de consulter.

Le Rapport 251 traite d'un mode de communication connexe, utilisant la propagation par impulsions météoriques.

BIBLIOGRAPHIE

ABEL, W. G., de BETTENCOURT, J. T., CHISHOLM, J. H. et ROCHE, J. F. [1955] Investigations of scattering and multipath properties of ionospheric propagation at radio frequencies exceeding the MUF. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1255-1268.

BAILEY, D. K. [1962] Ionospheric "forward" scattering. Exposé de synthèse à la XIII[e] Assemblée générale de l'URSI, Londres, septembre 1960, dans *Monograph on Ionospheric Radio*, 189-199, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.

BAILEY, D. K., BATEMAN, R., BERKNER, L. V., BOOKER, H. G, MONTGOMERY, G. F., PURCELL, E. M., SALISBURY, W. W. et WIESNER, J. B. [1952] A new kind of radio propagation at very high frequencies observable over long distances. *Phys. Rev.*, Vol. 86, 141-145.

BAILEY, D. K., BATEMAN, R. et KIRBY, R. C. [1955] Radio transmission at VHF by scattering and other processes in the lower ionosphere. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1181-1230.

BAIN, W. F. [1963] Solar-induced effects on VHF ionospheric propagation at low magnetic latitudes. Agardograph 59. The effect of disturbances of solar origin on communications, 185-192, Pergamon, Press, New York/Oxford.

BLAIR, J. C., DAVIS, R. M. et KIRBY, R. C. [1961] Frequency dependence of D-region scattering at VHF. *NBS J. Res.*, Vol. 65-D, 417-425.

BRAY, W. J. SAXTON, J. A., WHITE, R. W. et LUSCOMBE, G. W., [1956] VHF propagation by ionospheric scattering and its application to long-distance communications. *Proc. IEE*, Vol. 103, Part B, 236-260.

HALLEY, P., DUBOC, J. et THUILLIER, J. [1961] Etude des limites supérieures des fréquences susceptibles d'être réfléchies par l'ionosphère en Europe. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 16, 5-6.

KOCH, J. W. [1959] Factors affecting modulation techniques for VHF Scatter Systems. *IRE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-7, **2**, 77-79.

On pourra consulter, également, de longs passages des revues et documents suivants:

IRE Transactions on Communications Systems [mars 1956] **CS-4**.

Proc. IEE [mai 1958] **105**, Partie B; voir sous Session I, les mémoires présentés à un symposium et la discussion correspondante, sur le thème: «Ionospheric forward scatter propagation».

Proc. IRE [octobre 1955] **43**.

Proc. IRE [janvier 1960] **48**, 7-31. Rapport du JTAC: «Radio transmission by ionospheric and tropospheric scatter».

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 6M: BRUIT RADIOÉLECTRIQUE NATUREL ET ARTIFICIEL

Recommandations et Rapports

RECOMMANDATION 372-4

UTILISATION DES DONNÉES SUR LE BRUIT RADIOÉLECTRIQUE

(Question 29/6)

(1951-1953-1956-1959-1963-1974-1978-1982-1986)

Le CCIR

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

que, pour évaluer l'intensité ou d'autres caractéristiques du bruit radioélectrique d'origine artificielle et naturelle, on utilise les renseignements contenus dans les Rapports 258, 322-2 (voir la Remarque), 342, 670 et 720 jusqu'à ce que l'on dispose de données nouvelles justifiant une révision de ces Rapports.

Note 1. – La première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (Genève, 1984) a déjà adopté des valeurs pour les niveaux de bruit radioélectrique atmosphérique en se fondant sur le Rapport 322-2 (Genève, 1982).

Note 2. – On pourra également se référer aux résultats de mesures faisant l'objet du Rapport 254.

Remarque. – Il s'agit bien du Rapport 322-2 (Genève, 1982), étant donné qu'il reste encore à vérifier que les nouveaux renseignements contenus dans le Rapport 322-3 sont universellement applicables.

RAPPORT 258-4*

BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ARTIFICIEL

(Programme d'études 29C/6)

(1963-1970-1974-1978-1982)

1. Pour résoudre le problème que pose pour les télécommunications le bruit radioélectrique artificiel il est vivement souhaitable de pouvoir évaluer son niveau, en quelque endroit que ce soit et quel qu'en soit le type. Dans certains lieux, le bruit radioélectrique artificiel peut jouer un rôle prépondérant. Ce bruit peut avoir des origines très diverses (lignes d'énergie, appareillages industriels, systèmes d'allumage, etc.) et varie donc de façon importante selon l'endroit et le temps [Hagn, 1973 et 1981; Herman, 1971 et 1979; Horner, 1971; Skomal, 1978; URSI, 1975, 1978 et 1981].

2. Les renseignements actuellement disponibles ne permettent pas de calculer dans tous les cas, l'intensité du bruit artificiel. Des données de portée limitée [JTAC, 1968; Spaulding et Disney, 1974; Spaulding et autres, 1975] peuvent cependant servir à établir des valeurs typiques.

3. La Fig. 1 indique les valeurs médianes de la puissance du bruit artificiel exprimées en fonction de F_a (dB au-dessus du bruit thermique T_0 = 288 K, voir les Rapports 322 et 670) pour le bruit artificiel attribué à des sources artificielles; les courbes A, B, C et D se rapportent respectivement au quartier des affaires, aux quartiers résidentiels, aux zones rurales et aux zones rurales calmes; elles sont valables pour les Etats-Unis [Spaulding et Disney, 1974]. Les trois courbes les plus élevées sont fondées sur les résultats de mesures faites de 1966 à 1971, en 103 emplacements différents. Par «quartier des affaires», on entend celui dont la principale activité est de nature commerciale (magasins et bureaux, parcs industriels, supermarchés, principales rues et routes le long desquelles sont installées des entreprises commerciales diverses, etc.). Les «quartiers résidentiels» sont ceux qui sont principalement occupés par des logements familiaux simples ou multiples, où la densité d'habitation est d'au moins 5 maisons individuelles par hectare et où il n'y a pas de grande artère ni d'artère commerciale. Les zones rurales sont celles où il n'y a pas plus d'une habitation sur une superficie de 2 hectares. A ces définitions, il y a

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 1.

lieu d'ajouter une restriction, à savoir l'absence de toute source de bruit localisée et intense. La courbe D (zones rurales calmes) correspond à des valeurs du bruit artificiel en des lieux de réception calmes soigneusement choisis, selon les définitions du Rapport 322. La courbe en tirets E, établie pour le bruit galactique d'après le Rapport 322, a été incluse aux fins de comparaison. D'autres mesures limitées faites aux Etats-Unis [Spaulding et Disney, 1974] s'appliquent aux parcs et aux campus universitaires (où l'on trouve normalement moins de circulation automobile, d'appareils électriques et d'autres sources de bruit que dans les quartiers d'affaires ou résidentiels) ainsi qu'aux autoroutes (où l'allumage des voitures est la principale source de bruit).

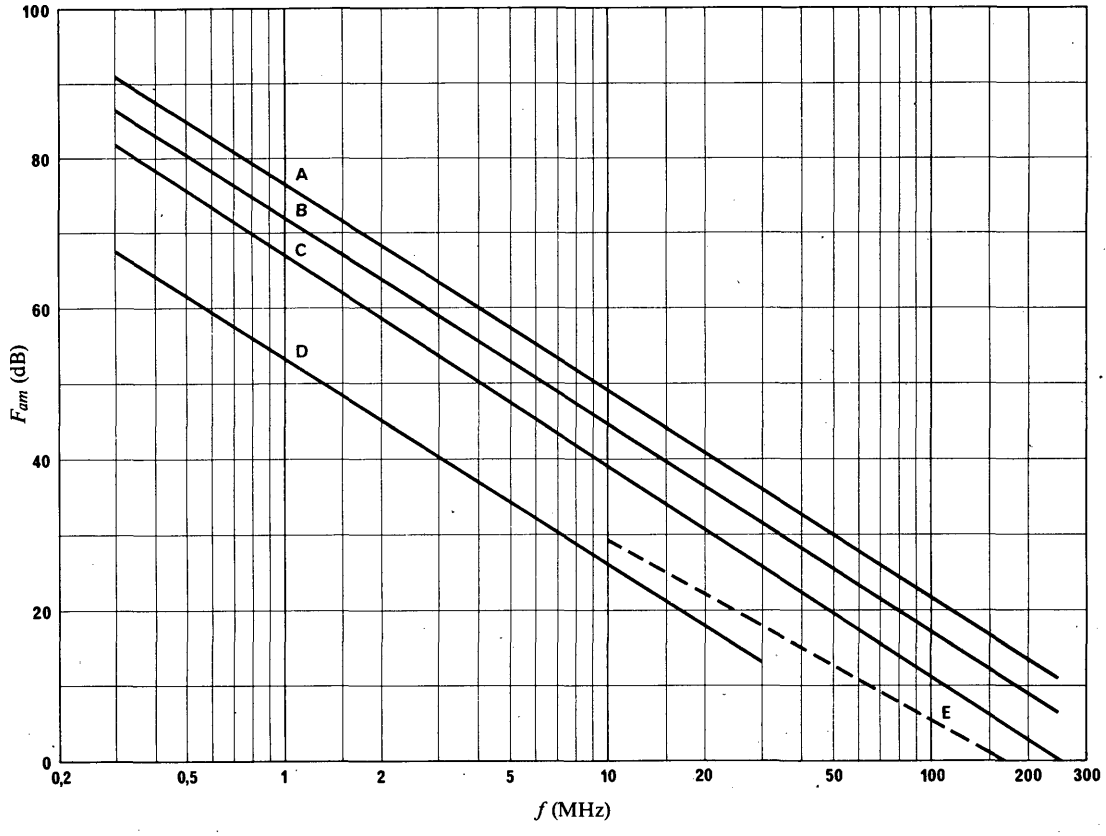


FIGURE 1 – *Valeurs médianes de la puissance du bruit artificiel mesurées avec une antenne unipolaire verticale courte sans pertes*

Catégories de milieux:
A: centres commerciaux
B: quartiers résidentiels
C: zones rurales
D: zones rurales calmes
E: bruit galactique

Dans tous les cas, comme pour les données de la Fig. 1, les résultats peuvent se représenter par une relation linéaire entre la valeur médiane F_{am} et la fréquence f, à savoir

$$F_{am} = C - d \log f \qquad (1)$$

f étant exprimé en MHz et c et d ayant les valeurs indiquées au Tableau I. A noter que la formule (1) s'applique à la gamme de fréquences 0,3 à 250 MHz, pour toutes les catégories de milieux, à l'exception de ceux qui sont représentés par les courbes D et E, comme indiqué sur la figure.

TABLEAU I — *Valeurs des constantes c et d*

Environnement	*c*	*d*
Quartiers des affaires (courbe A)	76,8	27,7
Autoroutes	73,0	27,7
Quartiers résidentiels (courbe B)	72,5	27,7
Parcs et campus universitaires	69,3	27,7
Zones rurales (courbe C)	67,2	27,7
Zones rurales calmes (courbe D)	53,6	28,6
Bruit galactique (courbe E)	52,0	23,0

Le Tableau II donne les variations mesurées pendant une durée d'une heure par rapport à la médiane horaire de la puissance du bruit en un emplacement déterminé. On y a porté les déciles supérieur et inférieur, respectivement D_u et D_l, pour un certain nombre de fréquences et pour trois catégories d'environnement.

Une indication de la variation observée d'un emplacement à l'autre à l'intérieur de chacune de ces catégories est fournie par Spaulding et Disney [1974]. Pour toutes les fréquences, les deux auteurs indiquent que l'écart type de la valeur médiane est de 7,5 et 6,5 dB respectivement, pour le quartier des affaires, les quartiers résidentiels et les zones rurales. Si l'on veut avoir une meilleure estimation de la variabilité de F_{am} en fonction de l'emplacement, pour ces catégories de milieux et pour une fréquence donnée, il conviendra d'utiliser les écarts type σ_{NL} indiqués dans le Tableau II et applicables aux fréquences de mesure.

Hagn et Sailors [1979] ont présenté quatre modèles de distribution statistiques de complexité croissante (gaussien simple, gaussien composite, χ carré et gaussien dérivé du χ carré) qui utilisent la variabilité de F_a dans le temps et dans l'espace afin de prévoir les probabilités de dépassement de certains niveaux de puissance de bruits artificiels, et cela pour des antennes courtes à polarisation verticale situées près du sol. Ces modèles sont utiles à ceux qui veulent prévoir la probabilité pour que le rapport signal/bruit à court terme pour un système de communication donné soit égal ou supérieur à la valeur qu'il doit avoir pour que les communications soient satisfaisantes [Hagn, 1980]. Les paramètres qui interviennent dans ces modèles sont indiqués dans le Tableau III pour chacune des fréquences de mesure. Pour le modèle gaussien simple, on prend respectivement F_{am} et σ_N comme valeurs approchées de la moyenne et de l'écart type, où:

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_{NL}^2 + \sigma_{NT}^2} \tag{2}$$

pour autant qu'il n'y ait pas de corrélation entre les variabilités temporelle et spatiale. Le paramètre σ_{NT} est l'écart type de la variabilité temporelle et les valeurs sont obtenues à partir de D_u et D_l (voir le Tableau II) en utilisant la formule:

$$\sigma_{NT} = \frac{1}{1{,}28}\left[\frac{D_u^2 + D_l^2}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Pour le modèle gaussien composite, les écarts types des moitiés supérieure et inférieure de la distribution sont respectivement donnés par σ_{Nu} et σ_{Nl} et la moyenne est donnée par F_{am}. Les déciles supérieur et inférieur correspondants sont donnés par D_{Nu} et D_{Nl}. Le modèle gaussien composite est le modèle le plus simple qui tienne compte de la dissymétrie de la distribution ($D_{Nu} \neq D_{Nl}$). Le modèle en χ carré tient compte lui aussi de cette dissymétrie; dans ce modèle, le paramètre υ est le nombre des degrés de liberté. Le modèle en χ carré satisfait à la formule $F_a = a + b_{\chi^2}$. Il permet de prévoir le bruit moyen $\overline{F}_a = a + b\nu$, et l'écart type $\sigma_{N_{\chi^2}} = b\,(2\nu)^{1/2}$ avec des valeurs de a, b, et ν indiquées dans le Tableau III pour dix fréquences discrètes comprises entre 0,25 MHz et 250 MHz. Pour ce qui est des détails concernant l'aménagement des données dans une distribution en χ carré ainsi que l'utilisation des paramètres ν, a et b du Tableau III, on se reportera à [Zacharisen et Crow 1970]. Dans le Tableau III figure un second modèle gaussien, qui fait usage de paramètres évalués à l'aide des approximations en χ carré. Pour ce modèle, la moyenne est donnée par $F_{a_{\chi^2}}$ et l'écart type par $\sigma_{N_{\chi^2}}$. Lorsque la dissymétrie n'est pas trop grande, les quatre modèles prévoient parmi les déciles, des valeurs semblables; c'est cependant le modèle en χ carré qui s'adapte le mieux à la distribution toute entière. Le modèle gaussien simple est à utiliser dans les cas où la dissymétrie n'est pas trop grande ($\nu \geqslant 10$) et lorsque l'on a besoin d'un modèle simple, comme dans les études de brouillage [Sailors et autres, 1977] (Rapport 657). Le modèle gaussien composite, qui tient compte de la dissymétrie, est celui qu'il y a lieu de retenir quand on dispose d'un moyen de déterminer la moitié appropriée de la distribution. Jusqu'à présent, il n'a pas été possible de choisir, parmi ces quatre modèles, celui qui offre, de façon constante, les meilleurs résultats. La description précitée peut servir d'orientation dans le choix du modèle approprié à appliquer dans un cas précis.

TABLEAU II — *Valeurs représentatives de certains paramètres mesurés du bruit. Catégories envisagées: quartiers des affaires, quartiers résidentiels et zones rurales*

Fréquence (MHz)	Type d'environnement											
	Quartiers des affaires				Quartiers résidentiels				Zones rurales			
	F_{am} (dB (kT_0))	D_u (dB)	D_l (dB)	σ_{NL} (dB)	F_{am} (dB (kT_0))	D_u (dB)	D_l (dB)	σ_{NL} (dB)	F_{am} (dB (kT_0))	D_u (dB)	D_l (dB)	σ_{NL} (dB)
0,25	93,5	8,1	6,1	6,1	89,2	9,3	5,0	3,5	83,9	10,6	2,8	3,9
0,50	85,1	12,6	8,0	8,2	80,8	12,3	4,9	4,3	75,5	12,5	4,0	4,4
1,00	76,8	9,8	4,0	2,3	72,5	10,0	4,4	2,5	67,2	9,2	6,6	7,1
2,50	65,8	11,9	9,5	9,1	61,5	10,1	6,2	8,1	56,2	10,1	5,1	8,0
5,00	57,4	11,0	6,2	6,1	53,1	10,0	5,7	5,5	47,8	5,9	7,5	7,7
10,00	49,1	10,9	4,2	4,2	44,8	8,4	5,0	2,9	39,5	9,0	4,0	4,0
20,00	40,8	10,5	7,6	4,9	36,5	10,6	6,5	4,7	31,2	7,8	5,5	4,5
48,00	30,2	13,1	8,1	7,1	25,9	12,3	7,1	4,0	20,6	5,3	1,8	3,2
102,00	21,2	11,9	5,7	8,8	16,9	12,5	4,8	2,7	11,6	10,5	3,1	3,8
250,00	10,4	6,7	3,2	3,8	6,1	6,9	1,8	2,9	0,8	3,5	0,8	2,3

F_{am}: valeur médiane

D_u, D_l: écarts du décile supérieur et du décile inférieur par rapport à la valeur médiane pendant une durée d'une heure en un emplacement donné

σ_{NL}: écart type de la variabilité en fonction de l'emplacement.

TABLEAU III — *Résumé des paramètres des modèles de bruit*

Type d'environnement	Freq. (MHz)	Gaussien simple		Gaussien composite				χ-carré			Gaussien dérivé de χ-carré	
		F_{am} (dB (kT_0))	σ_N (dB)	σ_{Nu} (dB)	σ_{Nl} (dB)	D_{Nu} (dB)	D_{Nl} (dB)	ν	*a*	*b*	$F_{a\chi^2}$ (dB (kT_0))	$\sigma_{N\chi^2}$ (dB)
Quartier des affaires	0,25	93,5	8,3	8,8	7,8	11,3	9,9	92,16	37,51	0,61	93,9	8,3
	0,50	85,1	11,6	12,8	10,3	16,4	13,2	32,12	39,26	1,46	86,1	11,7
	1,00	76,8	6,3	8,0	3,9	10,2	5,0	3,51	69,77	2,46	78,4	6,5
	2,50	65,8	12,4	13,0	11,8	16,7	15,1	142,29	− 38,56	0,74	66,3	12,4
	5,00	57,4	9,2	10,5	7,8	13,5	10,0	16,58	31,70	1,62	58,5	9,3
	10,00	49,1	7,7	9,5	5,3	12,1	6,8	4,95	38,38	2,49	50,7	7,8
	20,00	40,8	8,7	9,6	7,7	12,3	9,9	32,66	6,18	1,08	41,5	8,7
	48,00	30,2	11,1	12,5	9,5	16,0	12,2	20,91	− 4,69	1,73	31,4	11,2
	102,00	21,2	11,4	12,8	9,8	16,4	12,6	21,95	− 15,62	1,73	22,3	11,5
	250,00	10,4	5,6	6,4	4,5	8,3	5,8	12,28	− 2,80	1,13	11,1	5,6
Quartiers résidentiels	0,25	89,2	6,8	8,1	5,3	10,3	6,8	8,67	75,88	1,66	90,3	6,9
	0,50	80,8	8,5	10,5	5,7	13,5	7,4	4,67	69,42	2,84	82,7	8,7
	1,00	72,5	6,5	8,2	4,3	10,5	5,5	4,02	64,49	2,37	74,0	6,7
	2,50	61,5	10,4	11,3	9,4	14,4	12,0	45,36	12,58	1,09	62,2	10,4
	5,00	53,1	8,4	9,6	7,1	12,3	9,1	17,11	29,28	1,45	54,1	8,5
	10,00	44,8	6,1	7,2	4,9	9,2	6,2	10,38	31,57	1,36	45,7	6,2
	20,00	36,5	8,3	9,5	6,9	12,2	8,8	14,80	14,75	1,54	37,5	8,4
	48,00	25,9	8,8	10,4	6,8	13,3	8,7	8,90	8,53	2,11	27,3	8,9
	102,00	16,9	7,9	10,1	4,6	13,0	5,9	3,09	8,98	3,35	19,0	8,2
	250,00	6,1	4,9	6,1	3,2	7,8	4,1	4,13	0,00	1,74	7,2	5,0
Zones rurales	0,25	83,9	7,2	9,1	4,5	11,7	5,7	3,52	75,82	2,80	85,7	7,4
	0,50	75,5	8,5	10,7	5,4	13,7	6,9	3,78	65,57	3,17	77,6	8,7
	1,00	67,2	9,5	10,1	8,8	13,0	11,3	75,34	9,41	0,77	67,7	9,5
	2,50	56,2	10,2	11,2	9,0	14,4	11,5	28,78	18,36	1,35	57,1	10,2
	5,00	47,8	9,4	9,0	9,7	11,5	12,4	260,87	154,61	0,41	47,6	9,4
	10,00	39,5	6,8	8,1	5,1	10,4	6,5	7,49	27,37	1,78	40,7	6,9
	20,00	31,2	6,9	7,6	6,2	9,7	8,0	39,08	0,87	0,79	31,7	7,0
	48,00	20,6	4,5	5,2	3,5	6,7	4,5	9,84	11,27	1,02	21,3	4,5
	102,00	11,6	7,1	9,0	4,5	11,6	5,8	3,72	3,25	2,71	13,3	7,4
	250,00	0,8	3,0	3,5	2,3	4,5	3,0	9,20	− 5,29	0,71	1,2	3,0

4. Les mesures du bruit en ondes décamétriques faites au Royaume-Uni montrent que la courbe D s'applique bien aux zones rurales et que les valeurs de la puissance du bruit artificiel dans les centres commerciaux et les quartiers résidentiels sont inférieures aux valeurs données par les courbes A et B. Les mesures faites en ondes métriques dans les centres commerciaux et les quartiers résidentiels font apparaître des puissances du bruit artificiel inférieures de quelque 10 dB à celles des courbes A et B.

Il semble découler de ces résultats que des différences dans les schémas d'utilisation des appareils électriques et mécaniques ou dans les réglementations nationales sur les parasites radioélectriques peuvent conduire à des valeurs différentes de la puissance du bruit artificiel et que, en l'absence de nouvelles données confirmant la validité des courbes de la Fig. 1, celles-ci sont à employer avec prudence.

5. Skomal [1973, 1978] a examiné des données de bruit artificiel d'origine industrielle recueillies dans un certain nombre de pays à différentes distances des zones métropolitaines. Les résultats obtenus dans la gamme de fréquences comprises entre 500 kHz et 1 GHz sont présentés sous la forme d'une récapitulation. Dans la gamme située entre environ 300 et 800 MHz, il apparaît que le taux de diminution de la puissance de bruit en fonction de la fréquence est nettement inférieur à celui qui est constaté aux fréquences plus basses (voir le Tableau I). Ces résultats s'expliquent par la présence, dans la gamme des ondes décimétriques, d'un maximum localisé du spectre des émissions brouilleuses produites par l'allumage des véhicules automobiles.

6. En quatre emplacements situés dans le centre de la ville d'Ottawa, Lauber et Bertrand [1977] ont enregistré pendant une durée de 17 jours en novembre 1976 l'environnement radioélectrique en ondes métriques et décimétriques. Comme équation de régression linéaire des valeurs médianes de F_a pour ces quatre emplacements, aux fréquences comprises entre 200 et 500 MHz, ils ont trouvé: $F_{am} = -15{,}8 \log f + 48{,}4$ (f étant en MHz). Dans la gamme 200 à 300 MHz, cette équation conduit à des résultats dont la comparaison avec ceux de Spaulding et Disney [1974] pour le «quartier des affaires» est satisfaisante. Le Tableau IV ci-dessous fait connaître l'écart type σ_N et les déciles supérieur et inférieur, D_u et D_l, pour cette équation, pour les fréquences de mesure 200, 300, 400 et 500 MHz.

TABLEAU IV — *Paramètres de la distribution de F_{am} pour le «quartier des affaires»*

Fréquence (MHz)	Ecart type σ_N (dB)	D_u (dB)	D_l (dB)
200	4,7	5,0	6,0
300	4,6	7,0	4,5
400	4,2	5,5	4,5
500	4,1	6,5	2,5

7. Au-delà de 1 GHz pour le «quartier des affaires» et de 250 MHz pour les «quartiers résidentiels» et les «zones rurales», la mesure du bruit artificiel a été rendue difficile par le fait que le fonctionnement des récepteurs dont on disposait était du type «à limitation par le bruit interne». Dans un tel système de réception, le bruit externe n'affecte pas sensiblement le seuil de bruit de fonctionnement (voir les Rapports 413 (Oslo, 1966) et 670). Pratt et autres [1978] ont mesuré le bruit artificiel en milieu urbain à des fréquences comprises entre 1,7 et 35 GHz à l'aide de tehniques radiométriques; toutefois, les résultats ont toujours été inférieurs à la température de référence de 288 K.

8. Des mesures faites en Pologne dans les gammes des ondes hectométriques et décamétriques pour déterminer la variation du coefficient d'affaiblissement de propagation α pour le bruit artificiel en fonction de la densité de la population ρ ont conduit à la relation empirique:

$$\log \alpha = -3{,}47 + 0{,}690 \log \rho$$

où α est exprimé en dB/m et ρ, densité de la population, en nombre d'habitants à l'hectare. On a constaté que la valeur du coefficient d'affaiblissement ne dépend pratiquement pas de la fréquence [Rymarowicz, 1974, 1975].

Un résultat inattendu des mesures faites dans la gamme des ondes hectométriques a été que le bruit artificiel est moins intense dans les quartiers résidentiels des villes situées dans les régions fortement industrialisées du pays. Ce résultat va à l'encontre de l'opinion généralement établie, que la puissance du bruit artificiel est d'autant plus grande que l'industrialisation est plus poussée. La raison en est probablement que l'affaiblissement est plus grand sur des trajets franchissant des zones à grande densité de population dans des régions fortement industrialisées, alors que la densité des sources de bruit reste sensiblement constante [Morón et Rymarowicz, 1975]. Il est nécessaire de poursuivre les recherches pour confirmer ces résultats.

9. Des mesures de distributions de probabilité des amplitudes (DPA) du bruit artificiel provenant d'un environnement normal ou de sources spécifiques ont été effectuées en de nombreux endroits [Spaulding et autres, 1971; Lauber et Bertrand, 1979; Hagn, 1981].

Lauber et Bertrand [1979] ont communiqué les résultats d'une modélisation mathématique de statistiques d'amplitude utilisant des modèles empiriques et théoriques. Spaulding [1981] a présenté un résumé d'un grand choix de modèles mathématiques, la plupart conçus pour le bruit atmosphérique. Middleton [1979a, b] a établi une nouvelle série de modèles statistiques-physiques faisant intervenir les caractéristiques de processus physiques pour établir des expressions concernant les statistiques d'amplitude. Jusqu'à maintenant, ces modèles ont été utilisés pour un grand nombre de mesures de DPA et se sont avérés parfaitement adéquats.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HAGN, G. H. [1973] Radio noise of terrestrial origin. *Radio Sci.*, Vol. 8, 613-621.

HAGN, G. H. [1980] VHF radio system performance model for predicting communications operational ranges in irregular terrain. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-2B, 1637-1644.

HAGN, G. H. [1981] Man-made Electromagnetic Noise. *Handbook of Atmospherics*, Ch. 7, Ed. H. Volland, CRC Press, Boca Raton, Fla., Etats-Unis d'Amérique.

HAGN, G. H. et SAILORS, D. B. [1979] Empirical models for probability distributions of short-term mean environmental man-made radio noise levels. 3rd Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Rotterdam, 355-360 (s'adresser à EMC Symposium 1979, Postbus 5810, NL-2280 Rijswijk (ZH), Pays-Bas.

HERMAN, J. R. [1971] Survey of man-made radio noise. *Progress in Radio Science*, Vol. I, 315-348, URSI, Bruxelles, Belgique.

HERMAN, J. R. [1979] *Electromagnetic Ambients and Man-Made Noise.* Vol. III, Multi-Volume EMC Encyclopedia Series. Don White Consultants, Inc., Gainsville, Va. 22065, Etats-Unis d'Amérique.

HORNER, F. [1971] Techniques used for the measurement of atmospheric and man-made noise. *Progress in Radio Science*, Vol. II, 177-182, URSI, Bruxelles, Belgique.

JTAC [1968] Unintended radiation. *Suppl. 9 to Spectrum Engineering – The Key to Progress*, IEEE, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

LAUBER, W. R. et BERTRAND, J. M. [1977] Preliminary urban VHF/UHF radio noise intensity measurements in Ottawa, Canada. 2nd Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Montreux, Suisse, 357-362. (IEEE N° 77CH1224-5 EMC).

LAUBER, W. R. et BERTRAND, J. M. [1979] Statistical measurements and modelling of HVDC powerline noise. 1979 IEEE International symposium on Electromagnetic Compatibility, 9-11 octobre, San Diego, Calif., Etats-Unis d'Amérique, 224-231 (IEEE 79CH1383-9 EMC).

MIDDLETON, D. [1979a] Canonical non-Gaussian noise models: their implications for measurements and for prediction of receiver performance. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-21, **3**, 209-220.

MIDDLETON, D. [1979b] Procedures for determining the parameters of the first-order canonical models for class *A* and class *B* electromagnetic interference. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-21, **3**, 190-208.

MORÓN, W. et RYMAROWICZ, Z. [1975] Bruit industriel urbain dans des régions fortement ou faiblement industrialisées dans la gamme des ondes hectométriques. 1st Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Montreux, Suisse, 284-287.

PRATT, T., BROWNING, D. J. et RAHHAL, Y. [1978] Radiometric investigations of the urban microwave noise environment at 1.7, 8.8 and 35 GHz. Proc. IEE International Conference on Antennas and Propagation, Part 2 – Propagation, Londres, Royaume-Uni, 28-30 novembre, (IEE Conf. Publ. N° 169).

RYMAROWICZ, Z. [1974] Bruit industriel dans la gamme des ondes hectométriques dans les villes de Basse Silésie et influence de la population et de l'industrialisation de la ville sur ce bruit (en polonais). Institut des télécommunications, thèse de doctorat.

RYMAROWICZ, Z. [1975] Propagation du bruit dans les zones urbaines dans les gammes des ondes hectométriques et des ondes courtes. 1st Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Montreux, Suisse, 281-283.

SAILORS, D. B., KUGEL, C. P. et HAYDON, G. W. [1977] Predicting the compatibility of high frequency skywave communication systems. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 331-342.

SKOMAL, E. N. [1973] An analysis of metropolitan incidental radio noise data. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-15, 45-57.

SKOMAL, E. N. [1978] *Man-Made Radio Noise.* Van Nosrand Reinhold, Co, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

SPAULDING, A. D. [1981] *Handbook of Atmospherics,* Ch. 6, Ed. H. Volland, CRC Press; Boca Raton, Fla., Etats-Unis d'Amérique.

SPAULDING, A. D., AHLBECK, W. H. et ESPELAND, L. R. [1971] Urban residential man-made radio analysis and predictions. OT Telecommunications Research and Engineering Rep. 14, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

SPAULDING, A. D. et DISNEY, R. T. [1974] Man-made noise: Part I, OT Report 74-38, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

SPAULDING, A. D., DISNEY, R. T. et HUBBARD, A. G. [1975] Man-made noise: Part II, OT Report 75-63, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

URSI [1975] *Rev. of Radio Sci.* 1972-1974, 128-132. Union radio-scientifique internationale, Bruxelles, Belgique.

URSI [1978] *Rev. of Radio Sci.* 1975-1977, 57-64. Union radio-scientifique internationale, Bruxelles, Belgique.

URSI [1981] *Rev. of Radio Sci.* 1978-1980, El-E13, Union radio-scientifique internationale, Bruxelles, Belgique.

ZACHARISEN, D. H. et CROW, E. L. [1970] Fitting distributions of telecommunications variables with Chi-square distributions. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1307-1315.

RAPPORT 322-3 *

CARACTÉRISTIQUES DES BRUITS ATMOSPHÉRIQUES RADIOÉLECTRIQUES ET APPLICATIONS

(Question 29/6)

(1963-1974-1982-1986)

En accord avec les décisions de la XVI[e] Assemblée plénière, ce Rapport remplace le Rapport 322 (Genève, 1963) ainsi que le Supplément N° 1. Il sera publié séparément sous forme de fascicule.

RAPPORT 342-5

BRUIT RADIOÉLECTRIQUE DANS L'IONOSPHÈRE ET AU-DELÀ

(Programme d'études 29A/6)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Les niveaux de bruit radioélectrique observables par un satellite se déplaçant dans l'ionosphère dépendent, sous maints aspects, des caractéristiques du milieu entourant l'engin spatial. L'ionisation locale détermine la propagation des ondes radioélectriques. Selon les caractéristiques de cette ionisation, les émissions atteignent ou n'atteignent pas le satellite; dans le premier cas, c'est de l'ionisation locale que dépend l'ouverture angulaire apparente de l'antenne pour les rayonnements d'origine lointaine. L'ionisation modifie aussi l'impédance de l'antenne et, de ce fait, détermine le niveau de bruit observable. Les caractéristiques ionosphériques locales jouent aussi un rôle dans les mécanismes de génération de bruit. Elles ont donc généralement une importance de premier ordre en ce qui concerne les niveaux de bruit radioélectrique aux altitudes des satellites, et c'est en tenant compte de ce fait qu'on a établi le présent Rapport. Ainsi, la position de l'engin spatial dans l'ionosphère ou la magnétosphère a une influence déterminante sur la description des caractéristiques du bruit local, notamment lorsque la densité électronique et le champ magnétique font partie des paramètres de position. Pour plus de commodité, on a représenté dans la Fig. 1 la variation de ces deux paramètres en fonction de l'altitude en termes de fréquence de plasma et de gyrofréquence électronique, pour une région ionosphérique et magnétosphérique typique à latitude élevée. On a aussi représenté dans cette figure la variation en fonction de la hauteur de la fréquence critique du mode x et du mode z, de la fréquence de résonance hybride haute, de la fréquence du

---

* Cette nouvelle version du Rapport 322 a été adoptée par la XVI[e] Assemblée plénière (Dubrovnik, 1986) pour faciliter les études supplémentaires que devra effectuer la Commission d'études 6 (voir la Recommandation 372).

plasma et de la gyrofréquence électronique qui seront citées dans le présent Rapport. Aux latitudes plus basses, la situation est pratiquement la même au point de vue qualitatif à ceci près que certaines des courbes sont un peu décalées en fréquence. Dans ce Rapport, on spécifiera les bandes de bruit radioélectrique par des domaines de fréquences dont les frontières correspondent aux limites définies pour des modes de propagation particuliers. Ces modes de propagation dépendent de la latitude de l'engin spatial (et en particulier de la latitude magnétique invariante, à la surface de la Terre, de la coquille magnétique correspondante L [McIlwain, 1961].

Le présent Rapport traite principalement de la gamme des fréquences susceptibles d'intéresser les services radioélectriques pour lesquelles il est souhaitable que l'ionosphère constitue un écran par rapport à la Terre. De façon générale, cette gamme comprend les fréquences allant de 10 kHz à 20 MHz environ. Les facteurs étudiés présentent aussi de l'importance pour un grand nombre de travaux de recherche ionosphérique utilisant des satellites. Le bruit constitue lui aussi un facteur de limitation pour certains services dans lesquels on emploie des fréquences qui pénètrent dans l'ionosphère; en pareil cas, le bruit et les émissions d'origine terrestre doivent être considérés comme des sources possibles de brouillage. Dans le présent Rapport, on n'étudie pas en détail les sources de bruit qui rayonnent sur des fréquences très supérieures à la fréquence critique, mais on trouvera néanmoins un certain nombre d'indications sur le bruit provenant de sources terrestres.

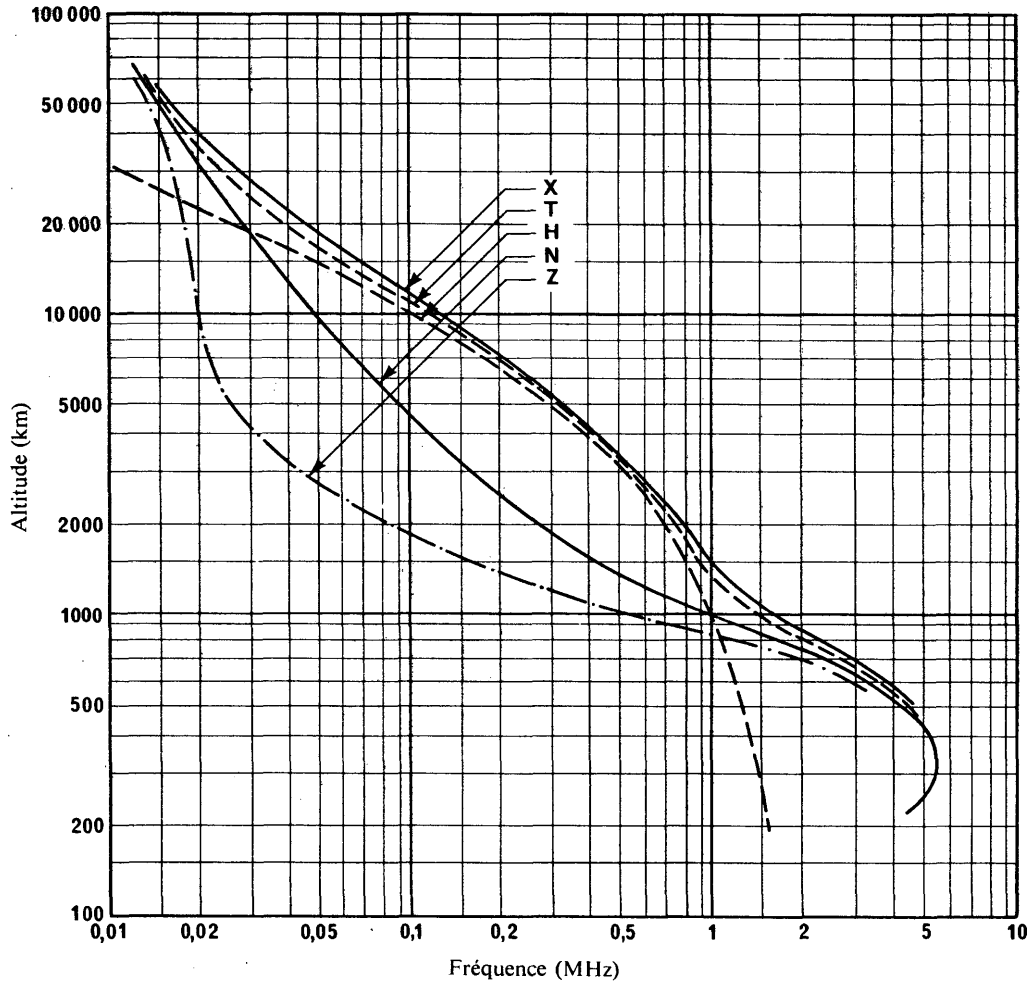


FIGURE 1 — *Variation en fonction de l'altitude, dans une ionosphère et une magnétosphère types aux latitudes élevées, des fréquences suivantes:*

- gyrofréquence électronique, $f_H = eB_0/2\pi m$, représentée par la courbe H.
- fréquence du plasma, $f_N = (N_e{}^2/4\pi^2\varepsilon_0 m)^{1/2}$, représentée par la courbe N.
- fréquence critique du mode z, $f_Z = [(f_H{}^2/4) + f_N{}^2]^{1/2} - f_H/2$, représentée par la courbe Z.
- fréquence de résonance hybride haute, $f_T = (f_N{}^2 + f_H{}^2)^{1/2}$, représentée par la courbe T.
- fréquence critique du mode x, $f_X = [(f_H{}^2/4) + f_N{}^2]^{1/2} + f_H/2$, représentée par la courbe X.

2. Bruit cosmique

On entend ici par bruit cosmique, les émissions de bruit galactique et, éventuellement, extragalactique, que peut observer l'engin spatial au-dessus de la fréquence limite de propagation de l'onde extraordinaire. Cette fréquence limite, représentée par fxS, est définie par l'expression:

$$\text{fxS} = \left[(f_H^2/4) + f_N^2\right]^{1/2} + f_H/2 \qquad (1)$$

Dans la terminologie ionosphérique habituelle, cette expression correspond à la relation $X = 1 - Y$, où $X = f_N^2/f^2$, et, $Y = f_H/f$; avec f_N (fréquence du plasma) $= (Ne^2/4\pi^2\varepsilon_0 m)^{1/2}$; f_H (gyrofréquence électro nique) $= eB_0/2\pi m$, et $f =$ fréquence d'observation.

Aux fréquences supérieures à 10 MHz environ, on a établi les niveaux de bruit cosmique de façon assez sûre à partir de mesures faites avec des équipements installés au sol [Andrew, 1966; Getmantsev et autres, 1968]. Sur des fréquences fixes inférieures à 10 MHz, des mesures ont été faites aussi à partir d'un certain nombre de fusées et de satellites [Walsh et autres, 1964; Huguenin et autres, 1964; Alexander et Stone, 1965; Benediktov et autres, 1965; Slysh, 1965 et 1966; Chapman, 1961] et des mesures ont été faites avec des récepteurs à fréquence fixe et à balayage de fréquence placés dans les satellites Ariel, Alouette, ISIS, RAE, Zond, Luna et ISS-b pour déterminer le spectre du bruit galactique [Smith, 1965; Hartz, 1964a; Hartz, 1969a; Alexander et autres, 1969a; Hakura et autres, 1969; Clark et autres, 1970; Grigorieva et Slysh, 1970; Kotaki et autres, 1981]. Les résultats concordent avec ceux obtenus par Ellis et autres [1962] au moyen d'un équipement installé au sol dans des conditions ionosphériques déterminées. Il ressort des résultats obtenus à partir de satellites et de fusées que le niveau de bruit varie quelque peu d'une région à une autre de la galaxie, mais comme dans la plupart des cas l'ouverture de l'antenne dépassait 2π stéradians, les variations ne sont pas grandes; elles sont probablement du même ordre que les incertitudes expérimentales.

La Fig. 2 représente quelques résultats de mesure du bruit cosmique (températures de bruit équivalentes) recueillis par des fusées et des satellites; dans le Tableau I, on a reproduit quelques valeurs prises sur la courbe lissée. Des mesures faites avec le satellite RAE [Alexander et autres, 1969a] concordent, dans les limites de l'erreur de mesure, avec les valeurs indiquées sur la Fig. 2. La portion de courbe tracée au-dessous de 0,6 MHz environ est fondée sur des mesures faites par le satellite IMP-6 entre 130 et 2600 kHz; ce sont les plus petites valeurs du bruit cosmique observé par ce satellite [Brown, 1973]. Les maximums mesurés étaient d'environ 1,5 à 2,0 dB supérieurs aux valeurs figurant dans le Tableau I.

Ces valeurs peuvent être converties en valeurs de brillance à l'aide de la relation:

$$\text{brillance } B = 2kT_A/\lambda^2 \text{ exprimée en W m}^{-2}\,\text{Hz}^{-1}\,\text{stérad}^{-1} \qquad (2)$$

T_A désignant la température équivalente de l'antenne, λ la longueur d'onde (m) et k la constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ joules/K). La densité de flux peut aussi être calculée par l'expression:

$$\text{densité de flux } S = 4\,\pi kT_A/\lambda^2, \text{ exprimée en W m}^{-2}\,\text{Hz}^{-1} \qquad (3)$$

Ces relations sont établies dans les hypothèses suivantes: les antennes typiques montées sur les engins spatiaux ont des ouvertures apparentes de 4π stéradians; elles reçoivent une seule composante de polarisation; enfin, le bruit a une polarisation quasi aléatoire. Les densités de flux sont indiquées dans le Tableau I. Aux fins de comparaison avec les valeurs indiquées dans d'autres rapports, dans lesquels on considère le facteur de bruit équivalent de l'antenne (par exemple le Rapport 322 sur les bruits atmosphériques), les valeurs de bruit sont également exprimées sous cette dernière forme dans le Tableau I. Les valeurs correspondant aux ondes décamétriques concordent à 2 dB près, avec celles que l'on trouve dans le Rapport 322 pour le bruit cosmique.

Dans la gamme de fréquences considérée et pour une antenne d'engin spatial de large ouverture apparente [Hartz et Roger, 1964], les températures de bruit indiquées au Tableau I sont les valeurs galactiques minimales qu'on peut observer dans l'ionosphère et au-delà. Si l'on observe, dans la même gamme de fréquences, des valeurs sensiblement plus élevées que celles de ce tableau, il y a lieu de rechercher l'existence de quelque autre source de bruit ou de brouillage. On a identifié plusieurs de ces types d'émission sporadiques ou occasionnels; ils sont étudiés dans les paragraphes qui suivent.

En utilisant des récepteurs réglés sur une fréquence fixe à bord du satellite ISS-b, on a mesuré le bruit galactique moyen sur les fréquences 5, 10 et 25 MHz [Kotaki et autres, 1981]. Ces résultats, exprimés en termes de température équivalente, sont indiqués dans la Fig. 2 où ils s'ajoutent aux résultats antérieurs. Le système de réception du satellite ISS-b comporte deux doublets montés dans le plan de rotation et décalés de 90° l'un par rapport à l'autre. Le Tableau II présente les résultats obtenus. F_a est la valeur moyenne observée sur chaque fréquence. σ_u et σ_l sont respectivement l'écart type supérieur et l'écart type inférieur par rapport à la valeur moyenne. Le rapport GC/AC est le rapport, en décibels, de la brillance radioélectrique dans la direction du centre de la galaxie et dans la direction opposée. La variation du bruit cosmique est due principalement à la direction d'un récepteur par rapport au centre de la galaxie. Les valeurs de F_a sont en accord avec celles qu'indique le Rapport 670 pour le bruit cosmique.

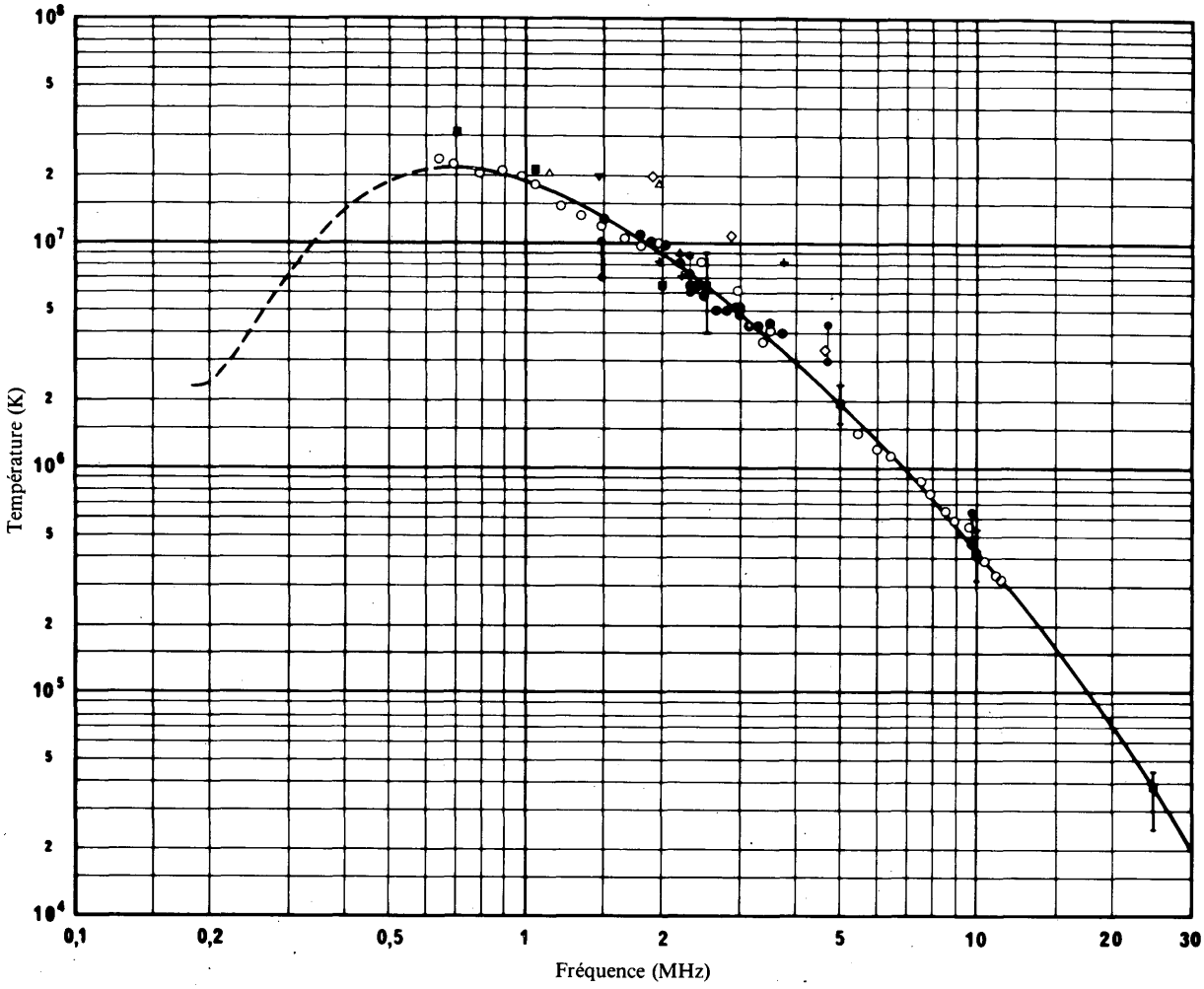


FIGURE 2 – *Température équivalente d'une antenne qui reçoit du bruit galactique*

- △ Walsh et autres, 1964
- ▲ Huguenin et autres, 1964
- ◇ Alexander et Stone, 1965
- ■ Benediktov et autres, 1965
- ▽ Slysh, 1965 et 1966
- \+ Chapman, 1961
- ▼ Smith, 1965
- Ellis et autres, 1962
- ● Alouette-1
- ○ Alouette-2
- -- Brown, 1973
- ISS-b

TABLEAU I — *Bruit de fond cosmique observé sur les récepteurs d'engins spatiaux*

f (MHz)	T ($\times 10^6$ K)	Puissance surfacique dans une seule composante de polarisation (10^{-21} W m^{-2} Hz^{-1})	Facteur de bruit équivalent de l'antenne (1) (dB)
0,2	2,4	0,18	39
0,4	14	4,3	47
0,6	21	15	49
0,8	21	26	49
1,0	19	37	48
2,0	9	69	45
3,0	5,0	86	42
5,0	1,8	86	38
10,0	0,42	80	31

(1) Température de référence 288 K.

TABLEAU II – *Intensité du bruit cosmique mesuré par le satellite ISS-b*
[Kotaki et autres, 1981]

	Fréquences (MHz)		
	5	10	25
F_a (dB/KT_0)	37,7	31,6	20,8
σ_u (dB)	1,1	1,0	1,2
σ_l (dB)	1,4	1,3	1,6
GC/AC (dB)	3,1	2,2	3,3

3. Bruit solaire

Des émissions de bruit radioélectrique d'origine solaire, ou pouvant être associées manifestement à l'activité solaire, ont été observées sporadiquement sur des fréquences supérieures à fxS avec différents engins spatiaux [Hartz, 1964b; Hartz, 1969b; Hakura et autres, 1969 et 1970; Alexander et autres, 1969b; Slysh, 1967; Benediktov et autres, 1968a; Grigorieva et Slysh, 1970; Haddock et Graedel, 1970]. Pendant les périodes de forte activité solaire, on a observé de façon suivie des sursauts de bruit de courte durée sur des fréquences pouvant s'abaisser jusqu'à 200 kHz et parfois même jusqu'à 50 kHz, voire plus bas, mais certaines des observations faites sur des fréquences s'abaissant jusqu'à 20 kHz ne sont pas toujours faciles à identifier comme étant liées à l'activité solaire [Slysh, 1967; Dunckel et autres, 1970; Malitson et autres, 1973; Fainberg et autres, 1972]. Aux fréquences plus élevées, on a pu établir dans de nombreux cas une nette corrélation avec des observations de sursauts solaires faites au sol. Des orages de bruit de grande durée et des phénomènes de type IV ont également été observés à l'aide de satellites; le niveau de bruit le plus élevé observé pour des phénomènes solaires est d'environ 10^{-16} W m^{-2} Hz^{-1} [Hartz, 1969b].

4. Bruit magnétosphérique

Les récepteurs de satellite fonctionnant dans les régions extrêmes de la magnétosphère, sur des fréquences supérieures à la fréquence du plasma local, captent souvent des niveaux de bruit nettement supérieurs à ceux qui peuvent être attribués au bruit cosmique. On a identifié au moins deux, et probablement trois types différents d'émission à large bande; par des mesures radiogoniométriques et des mesures de la distribution spatiale de l'intensité, l'origine de cette émission a été associée aux régions à plasma plus dense, plus proches de la Terre. Le premier type, à caractère très sporadique, avec des variations de courte durée, a probablement été observé pour la première fois par certaines des premières sondes spatiales soviétiques [Benediktov et autres, 1965, 1968a, 1968b, 1969; Slysh 1965, 1966, 1967]. Les observations ultérieures ont permis de mieux définir ce type de bruit (voir aussi [Huguenin et autres, 1964]), auquel on a donné des désignations diverses: bruit «passe-haut», «à fréquence moyenne», «kilométrique terrestre» et «kilométrique auroral» [Dunckel et autres, 1970; Brown, 1973; Gurnett, 1974; Kurth et autres, 1975; Benson, 1975]. Il se présente dans la gamme des fréquences comprises entre les limites approximatives de 30 kHz et 1,0 MHz, avec un maximum d'intensité au voisinage de 200 kHz, maximum qui peut parfois dépasser 10^{-14} W m^{-2} Hz^{-1}. Les études avec plusieurs satellites ont permis de localiser la source de ces émissions à des altitudes de l'ordre de deux rayons terrestres, aux latitudes aurorales et sur la face non éclairée de la Terre, le plus souvent au voisinage de 22 heures, heure locale. Ce type de bruit, étroitement associé à l'apparition de perturbations aurorales et géomagnétiques, est probablement causé par l'arrivée dans l'atmosphère d'électrons à grande énergie [Stone, 1973; Kaiser et Stone, 1975]. Il a été signalé dans certains cas sur des fréquences aussi basses que 20 kHz ou supérieures à 1,5 MHz, mais sa caractéristique essentielle réside dans la variabilité de ces apparitions et/ou de son intensité.

Le deuxième type de bruit, qui est un rayonnement du continuum, se trouve également dans les bandes d'ondes myriamétriques et kilométriques mais il est beaucoup plus faible que le précédent; d'autre part, il varie lentement ou peut même être continu. Sa fréquence limite inférieure, de l'ordre de 1 kHz, semble correspondre à la fréquence du plasma local au droit de l'engin spatial. Il présente un maximum près de 30 kHz; aux fréquences plus élevées, l'intensité de ce bruit décroît avec un indice spectral d'environ $-2,8$. Son niveau est par conséquent

généralement inférieur à celui du bruit cosmique pour les fréquences supérieures à environ 100 kHz; à signaler cependant qu'on l'a parfois observé jusqu'à 300 kHz. On observe des variations d'intensité qui semblent être en corrélation avec l'activité géomagnétique, mais on ne saurait affirmer que ce phénomène concerne toujours un seul type de bruit; quoi qu'il en soit, on a trouvé à 30 kHz une intensité d'environ 10^{-17} W m^{-2} Hz^{-1} pour des grandes valeurs de K_p [Brown, 1973; Stone, 1973; Gurnett, 1975; Frankel, 1973]. Ce type de bruit semble correspondre aux émissions «à large bande» qui ont été signalées par Dunckel et autres [1970]. Il semble prendre naissance dans une vaste région s'étendant sur la zone des heures du matin (de 4 heures à 14 heures environ, heure locale), immédiatement au-delà de la limite de la plasmapause. Il est possible que ce rayonnement soit dû à l'émission gyrosynchrotron des électrons énergétiques présents dans la ceinture de radiation extérieure; toutefois, cette hypothèse semble être mise en échec par les observations qu'on a pu faire sur la localisation temporelle de ce bruit et sur sa variation avec l'indice K_p. Une autre source possible est constituée par les particules qui se libèrent de la population «piégée» ou de la faille magnétosphérique [Stone, 1973]; mais, ici encore, il y a une certaine incompatibilité avec les heures locales. Gurnett et Frank [1976] ont proposé une autre source; il s'agit des électrons à une énergie relativement faible qui se trouvent injectés dans la ceinture de radiation extérieure, auquel cas la production du bruit peut être probablement associée à une instabilité du plasma cohérent.

Ce deuxième type de bruit a été subdivisé [Gurnett et Shaw, 1973; Gurnett, 1975] en deux composantes: une composante «piégée» sur les fréquences inférieures à la fréquence du plasma de la nappe magnétosphérique ou du vent solaire; et une composante libérée, sur les fréquences qui peuvent se propager librement dans l'espace interplanétaire.

Kaiser et Stone [1975] ont signalé un type d'émission, également sur des fréquences supérieures à la fréquence du plasma local, qui semble être produite plus ou moins en permanence dans l'ovale auroral correspondant aux heures de jour. Ce rayonnement est très faible, avec des intensités seulement dix fois plus grandes environ que celles du bruit cosmique de fond; il est présent dans une bande de fréquences étroite, avec un maximum un peu au-dessous de 200 kHz. Il semble qu'on ait affaire ici à une émission différente de celle du continuum dont il a été question plus haut; il y a lieu de préciser davantage ces caractéristiques, notamment l'heure locale d'apparition. Kaiser et Stone ont émis l'hypothèse que ce type d'émission aurait pour origine une précipitation de particules aurorales qui est caractéristique du secteur diurne de l'ovale auroral et qui, par conséquent, est quasi continue, contrairement au bruit kilométrique auroral à caractère sporadique se produisant la nuit. On sait que cette région est le siège d'intenses précipitations d'électrons à faible énergie, presque en permanence; il semble tout à fait vraisemblable que l'on puisse avoir des émissions de bruit assez similaires au rayonnement kilométrique auroral nocturne à caractère sporadique.

En plus de ces émissions à large bande, les récepteurs de satellite évoluant dans la magnétosphère ont capté plusieurs émissions à bande relativement étroite qui peuvent être liées à des fréquences caractéristiques du milieu local et qui semblent être de nature électrostatique. La première est une bande limitée par la fréquence hybride haute locale (f_T) et la fréquence du plasma local (f_N), avec:

$$f_T^2 = f_N^2 + f_H^2 \tag{4}$$

Ce type de bruit a été étudié plus spécialement aux faibles altitudes et dans l'ionosphère; il en sera question au paragraphe suivant. On l'observe également dans un grand intervalle d'altitudes dans la plasmasphère et dans la magnétosphère, et on lui donne le nom de bruit à résonance hybride haute [Shaw et Gurnett, 1975; Mosier et autres, 1973].

Il existe un autre type de bruit constitué par des émissions électrostatiques intenses à bande étroite, sur des fréquences comprises entre les harmoniques de la fréquence cyclotron locale des électrons. Il s'agit des harmoniques $(n + \frac{1}{2})\, f_H$ [Kennel et autres, 1970; Fredricks et Scarf, 1973]; à signaler cependant que les émissions n'apparaissent pas exactement sur les demi-harmoniques. On pense qu'elles sont dues à l'instabilité électrostatique ayant pour origine une distribution non maxwellienne de la vitesse des électrons. On peut observer les harmoniques au-dessus et au-dessous de f_N; ils existent dans une grande partie de la magnétosphère extrême, mais ils semblent avoir leur intensité et leur persistance maximales près de la base de la nappe de plasma. Les souffles électromagnétiques à bande étroite ont souvent été observés au voisinage de la plasmapause au-dessous de la fréquence cyclotron locale des électrons. Ils semblent engendrés au voisinage de la plasmapause équatoriale [Ondoh et autres, 1980a].

Sur la base d'enregistrements effectués par le satellite IMP-6 dans la magnétosphère, Shaw et Gurnett ont identifié deux variantes de ces types de bruit électrostatiques: des émissions électrostatiques «à bande étroite» et «diffuses». Ces émissions apparaissent le plus souvent entre des harmoniques de f_H se trouvant au voisinage de f_N; on les a détectées très loin dans la plasmapause, à des distances radiales pouvant atteindre dix rayons terrestres, et elles semblent être une caractéristique permanente de la magnétosphère. Elles sont généralement caractérisées par des champs électriques peu intenses (champs à large bande de l'ordre de 2 μV/m). Ces bandes semblent fusionner continuellement avec les deux types précédents d'émissions de plasma, avec le bruit à résonance hybride haute à l'intérieur de la plasmasphère, et avec des harmoniques $(n + \frac{1}{2})\, f_H$ dans les régions extrêmes de la magnétosphère.

5. Bruit ionosphérique

5.1 *Bruit dans le mode sifflement*

Un certain nombre de mesures ont été faites avec des récepteurs d'ondes myriamétriques à bord de fusées et de satellites; les résultats varient considérablement aussi bien avec le temps qu'avec la position de l'engin spatial. On considérera ici les fréquences transmises selon le mode sifflement, qui sont inférieures aux plus basses valeurs de f_H et f_N au niveau de l'engin spatial et supérieures à la fréquence de résonance hybride basse locale f_{LHR}.

Cette dernière fréquence est définie par l'expression:

$$f_{LHR}^{-2} = 1836\,(f_N^{-2} + f_H^{-2})\,\bar{m}_{eff} \tag{5}$$

où $\bar{m}_{eff} = (\Sigma A_i m_p / m_i)^{-1}$ (A_i et m_i sont respectivement la masse fractionnelle et la masse de chaque constituant ionique, et m_p la masse du proton). Pour les principales régions ionosphériques, f_{LHR} est généralement inférieure à 10 kHz.

Dans la bande des ondes myriamétriques, l'intensité du bruit observé varie de plusieurs ordres de grandeur et l'on commence maintenant à connaître les tendances de cette variation. La plupart des valeurs indiquées portent sur des fréquences voisines de 10 kHz et leurs maximas sont compris entre 10^{-11} W m^{-2} Hz^{-1} environ et une valeur inférieure à 10^{-16} W m^{-2} Hz^{-1} [Oelberman, 1964; Leiphart et autres 1962; Gurnett, 1966; Jørgensen, 1968; Shawhan et Gurnett, 1968; Dunckel et Helliwell, 1969; Hughes et autres, 1971; Gurnett et Frank, 1972]. Plusieurs auteurs ont déterminé une intensité typique ou moyenne d'environ 10^{-14} W m^{-2} Hz^{-1}, mais ce chiffre ne doit être admis qu'avec une certaine prudence du fait de la très grande valeur de la variance. Il devient maintenant évident que les valeurs les plus élevées sont observées dans un intervalle de latitudes assez limité, correspondant à l'arrivée, dans la haute atmosphère, de particules énergétiques chargées provenant du vent solaire et de la magnétosphère. Les travaux de Gurnett [1966], Hughes et Kaiser [1971], Barrington et autres [1971], ainsi que d'autres chercheurs indiquent que, en moyenne, le bruit le plus intense est observé dans les secteurs de l'ovale auroral correspondant à midi, à l'après-midi et au soir et que l'intensité moyenne de ce bruit y est de l'ordre 2×10^{-13} W m^{-2} Hz^{-1}. Ce bruit est généralement caractérisé par une large bande; il est souvent très intense à des fréquences supérieures à f_{LHR} et, de ce fait, il a été appelé «bruit à résonance hybride basse» par certains auteurs [Brice et Smith, 1964; McEwen et Barrington, 1967]. Il semble toutefois qu'il n'y ait guère de raison de penser que ce bruit est fondamentalement différent de ce que certains auteurs ont appelé «le souffle TBF» [Gurnett, 1966] ou de ce que l'on appelle maintenant, du moins pour les latitudes élevées, le «souffle auroral». Aux fréquences comprises entre 10 kHz et 20 kHz, des émissions «montantes» ou souffles TBF avec structures fines montantes ont été observées aux latitudes moyennes dans l'ionosphère supérieure lors de la phase de retour au calme qui suit un sous-orage magnétique [Ondoh et autres, 1981].

On observe le bruit dans le mode sifflement sur des fréquences très supérieures à 10 kHz et il semble être continu jusqu'à la plus faible des deux valeurs suivantes: f_H ou f_N [Walsh et autres, 1964; Harvey, 1968; Hartz, 1969a]. L'intensité du bruit semble décroître brusquement lorsque la fréquence augmente [Jørgensen, 1968; Shawhan et Gurnett, 1968]. Aux fréquences supérieures à 100 kHz, l'intensité moyenne du bruit dans les secteurs de l'ovale auroral correspondant à midi et au soir est d'environ 4×10^{-17} W m^{-2} Hz^{-1} [Barrington et autres, 1971; Laaspere et autres, 1971]. Aux latitudes plus basses, cette valeur est de l'ordre de 10^{-19} W m^{-2} Hz^{-1} ou moins. Pour la fréquence de 540 kHz, la valeur de $1{,}7 \times 10^{-18}$ W m^{-2} Hz^{-1} a été indiquée comme valeur typique pour le souffle auroral [Laaspere et autres, 1971]. Toutefois, pour cette fréquence et pour la fréquence de 200 kHz, on a observé des valeurs maximales mille fois plus élevées environ que les niveaux typiques du souffle auroral.

Il semble avoir été démontré qu'il existe une relation univoque entre les électrons arrivant avec une énergie de l'ordre de 100 eV et l'intensité des émissions dans le mode sifflement [Hartz, 1971; Gurnett et Frank, 1972; Hoffman et Laaspere, 1972; Whitteker et autres, 1972; Walsh et autres, 1975]. On pense que ce type de bruit est produit par un phénomène mettant en jeu des particules cohérentes, c'est-à-dire un phénomène dans lequel des interactions collectives jouent un rôle décisif. Au-dessus de 100 kHz environ, les émissions semblent correspondre à des ondes électriques à prédominance longitudinale contrairement aux bandes myriamétriques où elles ont un caractère électromagnétique [James, 1973a, b].

On a essayé de diverses façons d'expliquer les niveaux de bruit du mode sifflement en se référant au rayonnement de Cerenkov produit par de tels électrons [Lim et Laaspere, 1972; James, 1973b; Maeda, 1973; English et Hughes, 1974; Taylor et Shawhan, 1974; Smith, 1975]. Les instabilités cyclotroniques d'électrons énergétiques dans la plamasphère extérieure constituent également un important processus de rayonnement expliquant le souffle plasmasphérique du mode sifflement électrostatique. Le souffle plasmasphérique est le plus fort de tous les bruits ionosphériques à moyenne et à basse latitudes et il se produit de manière persistante aussi bien en périodes de perturbation que de calme magnétique [Thorne et autres, 1973; Ondoh et autres, 1983].

En plus du bruit associé au mode des sifflements et des autres bruits transmis dans la gamme des fréquences comprises entre f_N et f_T, le satellite Ariel-4 a décelé, à une altitude de 500 km, deux autres types de bruit, l'un et l'autre à large bande [Walsh et autres, 1975]. L'un d'eux est un bruit sporadique couvrant toute la gamme des fréquences de mesure (0,25 à 4 MHz) et dont le niveau est supérieur d'environ 80 dB à celui du bruit cosmique.

Cette large gamme de fréquences s'étend dans de nombreuses régions du diagramme de Clemmow, Mullaly et Allis (CMA) [Stix, 1962] mais couvre souvent la Région 5 qui ne se prête pas à la propagation; en conséquence, ce bruit est attribué à quelque interaction inconnue entre le satellite et le plasma environnant. Les mêmes considérations s'appliquent au deuxième type de bruit, qui s'est produit lorsque la valeur locale de f_N dépassait 6 MHz environ et qui a décru de 40 dB ou plus lorsque la fréquence augmentait, tout en restant dans la gamme de mesure.

5.2 *Bruit ionosphérique associé à la résonance hybride haute*

Walsh et autres [1964] ont observé des niveaux de bruit singulièrement élevés sur 0,75, 1,225 et 2,0 MHz, au cours d'un vol de fusée; ils ont pu les imputer à certaines caractéristiques de l'ionosphère. En particulier, ils ont montré que le bruit s'intensifiait fortement lorsque la fréquence du récepteur était comprise entre la fréquence du plasma local, f_N, et la fréquence hybride haute locale, f_T. Ces auteurs associent l'intensification du bruit à un domaine particulier des diagrammes CMA à savoir la Région 3; c'est pourquoi ce type de bruit est souvent appelé «bruit de la Région 3». Le domaine de fréquences est limité d'un côté par la plus grande des deux valeurs f_N et f_H, et de l'autre côté par f_T; c'est aussi une région où l'on peut prévoir que les interactions ondes-particules provoquent un rayonnement électrostatique. Comme indiqué plus haut, on observe ces émissions électrostatiques de la Région 3 dans la magnétosphère; on leur a donné le nom d'émissions «à résonance hybride haute». Ces émissions sont observées communément dans l'ionosphère. Harvey [1965 et 1968] a rapporté des observations faites à partir du satellite Ariel-2 qui étaient similaires à celles de Walsh et autres [1964]; il a montré que l'intensité du bruit était en rapport avec le flux de particules énergétiques dans la zone intérieure de la ceinture de Van Allen. Il a signalé aussi qu'une autre bande de bruit anormalement intense, en rapport aussi avec le flux de particules énergétiques, pouvait être observée dans la gamme de fréquences limitée vers le haut par la fréquence du plasma local et vers le bas par la fréquence de coupure de l'onde extraordinaire fzS au niveau du satellite. Dans la terminologie ionosphérique usuelle, fzS correspond à la condition $X = 1 + Y$; elle est définie par la relation:

$$\text{fzS} = \left[(f_H^2/4) + f_N^2\right]^{1/2} - f_H/2 \qquad (6)$$

On pense que cette deuxième bande de bruit a pour origine le bruit «de la Région 3» et qu'il a des chances d'apparaître dans l'autre région spectrale sous l'effet du couplage des modes et de la propagation aux fréquences inférieures à f_N local.

Des résultats similaires ont été communiqués par Hartz [1967 et 1969a], Bourenine et autres [1968], Bauer et Stone [1968], Gregory [1969 et 1971] et Walsh et autres [1975]. Les plus récents indiquent que l'on observe les intensités maximales aux latitudes élevées et qu'il existe une relation entre l'intensité du bruit et l'arrivée de particules énergétiques. A noter que les résultats de Gregory ont été obtenus avec une antenne cadre, ce qui semblerait indiquer que ce type de bruit n'est pas de nature exclusivement électrostatique.

5.3 *Bruit sur les fréquences supérieures à f_T*

James et autres [1973] ont observé, dans les enregistrements effectués par les satellites ISIS-1 et 2, quelques bandes de bruit étroites au voisinage de 2 et 4 MHz. Ces émissions apparaissent dans un intervalle de latitudes centré approximativement sur l'ovale auroral; leur intensité est un multiple (plusieurs puissances de dix) de celle du bruit de fond cosmique, tout au moins pendant certaines périodes. On pense que ce type de bruit prend sa source dans un phénomène électrostatique, aux latitudes aurorales, au-dessous du satellite, dans une région où $f_T = 2f_H$; ce phénomène est suivi d'une conversion de mode et d'une propagation vers le haut, ce qui fait que le satellite peut observer un rayonnement électromagnétique dans une bande de fréquences étroite et sur le premier harmonique.

Il arrive que la bande de fréquences basse, c'est-à-dire la bande voisine de 2 MHz, s'abaisse jusqu'à une fréquence de coupure apparente dont la valeur est double de f_H local. A d'autres moments, cette bande semble être encore plus large, s'abaissant jusqu'à la valeur de f_T local. Cela se produit pendant les perturbations ionosphériques, lorsque le satellite se trouve au-dessus de l'ovale auroral nocturne: ce type de bruit serait alors l'analogue du «rayonnement kilométrique auroral» en ondes myriamétriques que les satellites observent à des altitudes plus grandes.

5.4 *Bruit ionosphérique dans d'autres régions du spectre*

Pour une grande partie de l'ionosphère, la valeur de f_N est comparable à celle de f_H; elle peut être plus élevée ou plus petite, mais le rapport des deux valeurs ne dépasse jamais 10 environ. Le diagramme CMA [Stix, 1962] est un moyen très commode pour spécifier les régions spectrales sur la base des modes de propagation et des mécanismes possibles de production du bruit. Les observations du bruit au moyen des satellites ionosphériques, notamment Alouette et ISIS, ont montré que ces émissions peuvent être observées, dans des conditions favorables, dans toutes les régions du spectre. Les émissions décrites plus haut sont les plus fréquentes; elles sont liées manifestement aux latitudes aurorales et aux interactions des particules chargées. Il est probable que d'autres types d'émissions spectrales dérivent de ces types fondamentaux et qu'on peut les observer en tant que tels. Ils sont la conséquence d'une conversion de mode et d'une propagation à partir de la région d'origine.

Le bruit de la Région 3 semble faire exception. Pour un grand nombre d'enregistrements obtenus par Alouette-2 et ISIS, cette bande de bruit apparaît sur des fréquences inférieures à fzS et supérieures à f_H (bien que cette dernière limite soit sujette à fluctuations) dans les conditions où fzS est supérieure à f_H [Hartz, 1967 et 1969a]. Comme cette gamme de fréquences n'est pas comprise dans celle utilisée pour la propagation des ondes électromagnétiques, on est peut-être en droit de supposer que la bande de bruit en question provient d'une source locale, par exemple, l'interaction entre le satellite lui-même et le milieu ambiant.

En raison des incertitudes relatives à l'impédance des antennes et à la nature des phénomènes observés, il est difficile d'évaluer l'intensité absolue des divers types de bruit considérés dans le présent paragraphe. Toutefois, les valeurs indiquées sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur au niveau prévu du bruit cosmique et il convient d'en tenir compte.

6. Brouillage d'origine terrestre

Un engin spatial peut subir un brouillage dû à des émetteurs d'ondes décamétriques installés au sol, sur des fréquences supérieures à la fréquence de pénétration ionosphérique ou, comme il est plus généralement convenu de l'appeler, à la fréquence critique. Cette fréquence critique varie avec la région géographique, l'heure du jour, la saison et l'activité solaire; elle peut s'abaisser à 0,5 MHz la nuit sous certaines latitudes ou s'élever au-dessus de 15 MHz le jour dans les régions équatoriales. En conséquence, il est possible qu'un récepteur de satellite à haute altitude puisse, dans cette gamme de fréquences et aux fréquences supérieures, subir un brouillage intense provenant de la Terre. Des mesures faites sur des signaux brouilleurs de ce genre ont montré que leur niveau dépasse de plus de 50 dB celui du bruit cosmique [Huguenin et Papagiannis, 1965]. Dans les intervalles de fréquence relativement étroits entre émetteurs terrestres, les intensités de crête du brouillage dû aux atmosphériques peuvent dépasser nettement le niveau du bruit galactique au-dessus des principales zones orageuses du globe [Huguenin et Papagiannis, 1965; Horner, 1965; Aksenov et autres, 1970; Horner et Bent, 1969; Herman et autres, 1973]. Rawer [1967] a fait une étude préliminaire du bruit provenant de sources terrestres. Se fondant sur des données de RAE-1, Herman et autres [1975] ont étudié récemment les émissions en provenance de la Terre qui sont liées à des orages et à d'autres causes artificielles. L'occurence des échos réfléchis par le sol observée par Alouette-1 a été utilisée comme mesure qualitative du niveau de bruit en ondes décamétriques dans l'ionosphère supérieure [Muldrew et autres, 1967].

Sur les fréquences supérieures à foF2, il apparaît que l'énergie du bruit terrestre au-dessus de l'ionosphère dépend de la fréquence selon une loi qui fait intervenir la valeur de foF2 au-dessous de l'engin spatial. Pour une valeur constante de foF2, l'énergie du bruit augmente avec la fréquence d'observation f, en raison de l'accroissement des dimensions effectives de la source, dont le rayon est fonction du rapport foF2/f [Herman et autres, 1975; Horner et Bent, 1969]. Quand on passe de 5 à 10 MHz, l'accroissement est normalement de l'ordre de 20 dB. En l'absence de signaux brouilleurs provenant du sol, l'énergie de bruit maximale s'observe sur une fréquence (typiquement comprise entre 10 et 15 MHz) sur laquelle l'ionosphère cesse de limiter les dimensions effectives de la source. A des distances de l'ordre de celle de la Terre à la Lune, le niveau du bruit transmis sur des fréquences supérieures de quelques MHz à foF2 et provenant de la direction de la Terre peut dépasser de 6 à 12 dB celui du bruit cosmique de fond [Herman, 1974]; le niveau de brouillage d'émetteurs au sol peut être très supérieur à cette valeur.

La théorie magnéto-ionique d'Appleton-Hartree prévoit que le brouillage causé par des émetteurs au sol peut être reçu par un engin spatial évoluant au-dessus du maximum d'ionisation de la couche F, lorsque

$$\text{foF2} < \sqrt{2}\, f_{HF2} \tag{7}$$

aux fréquences comprises entre fzF2 et fzI si fzI > fzF2

foF2 étant la fréquence critique ordinaire de la couche F pour l'onde ordinaire, f_{HF2} la gyrofréquence au sommet de la couche F, fzF2 la fréquence critique de l'onde extraordinaire de la couche F qui a pour expression:

$$\text{fzF2} = \left[\frac{(f_{HF2})^2}{4} + (\text{foF2})^2\right]^{\frac{1}{2}} - \frac{f_{HF2}}{2} \tag{8}$$

où fzI est la fréquence de l'onde se propageant selon le mode z au niveau de l'engin spatial, ce qui correspond aux conditions dans lesquelles l'indice de réfraction pour le mode de propagation z sous incidence verticale devient infini; on a:

$$\text{fzI} = \left[\frac{f_T^2}{2} + \left[\frac{f_T^4}{4} - f_N^2 f_H^2 \cos^2\theta\right]^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

où l'indice z se rapporte à la branche inférieure de la trace de l'onde extraordinaire selon l'équation d'Appleton-Hartree [Budden, 1961]; f_N, f_H, et f_T ont été définis plus haut, et θ est l'angle formé par la verticale et la direction du champ magnétique terrestre.

Lorsque foF2 < $\sqrt{2}f_{HF2}$, la principale source de brouillage est constituée par les émissions normales de radiodiffusion à ondes hectométriques sur les fréquences comprises entre 0,54 et 1,3 MHz environ [Hagg et autres, 1969]. Les récepteurs de satellite captent aussi souvent des émissions Loran sur 2 MHz, lorsque foF2 est petit [Legg et Newman, 1967]. Ces types de brouillage sont assez habituels la nuit pendant les mois d'hiver, au-dessus de la région où la couche F présente la dépression la plus marquée [Muldrew, 1965].

La théorie magnéto-ionique d'Appleton-Hartree prévoit également des brouillages causés par des émetteurs au sol sur des fréquences inférieures à fwI; fwI représente la fréquence critique de l'onde se propageant selon le mode des sifflements au niveau de l'engin spatial, ce qui correspond à la condition dans laquelle le mode sifflement à incidence verticale devient infini; on a:

$$\text{fwI} = \left[\frac{f_T^2}{2} - \left[\frac{f_T^2}{4} - f_N^2 f_H^2 \cos^2\theta\right]^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

où l'indice w désigne la branche inférieure de la trace de l'onde ordinaire et f_N, f_H, f_T et θ sont définis plus haut. La fréquence la plus élevée à laquelle on peut détecter le mode sifflement au niveau de l'engin spatial est égale à:

$$f_N \text{ si } f_N < f_H \text{ et} \tag{11}$$

$$f_H \text{ si } f_H < f_N \tag{12}$$

Le brouillage se propageant à travers le maximum d'ionisation de la couche F selon le mode sifflement résulte du couplage des signaux se propageant selon le mode z et le mode sifflement dans les régions D et E de l'ionosphère. Ce couplage peut aussi se produire dans la région F lorsque foE < f_{HF2} (foE est la fréquence critique de la branche supérieure de la trace ordinaire de la couche E) mais ce couplage est inefficace du fait que la fréquence de collision est faible dans la région F.

Les brouillages dus au mode sifflement relevés sur les ionogrammes fournis par Alouette-2 et par ISIS, sont principalement attribués à des émissions d'impulsions des systèmes Loran C à 0,1 MHz, les émissions de radiodiffusion sur ondes longues entre 0,15 et 0,3 MHz, et les émissions usuelles de radiodiffusion en ondes hectométriques entre 0,54 et environ 1,3 MHz.

On reconnaît aujourd'hui l'existence d'un second type de brouillage industriel pour la réception à bord des satellites. En raison du comportement non linéaire du plasma ionosphérique qui entoure l'engin spatial, des signaux radioélectriques discrets peuvent donner lieu à des fréquences de battement ou à des produits transmodulation. Ces battements peuvent être dus à diverses combinaisons des fréquences de ces signaux discrets, qui peuvent être émis par le satellite lui-même, entre elles et avec leurs harmoniques; ces signaux peuvent se produire sur des fréquences de résonance ionosphérique, excitées par les émissions du satellite suivant un certain mode non linéaire, ou même provenir d'émetteurs installés sur la Terre. De nombreux exemples de ce type de brouillage apparaissent sur les enregistrements effectués par Alouette et ISIS sur des fréquences bien inférieures à la fréquence critique ionosphérique. Certains de ces effets sont peut-être attribuables à une propagation très oblique de rayons émis de la Terre sur la fréquence observée, ou à des battements engendrés dans l'équipement de réception lui-même. Cependant, dans bien des cas, ces explications ne résistent pas à l'examen, et l'on en a conclu qu'une proportion appréciable des fréquences de battement observées sont engendrées dans le plasma ionosphérique au voisinage de l'engin spatial [Barrington et Hartz, 1968 et 1969; Hagg, 1967; Hartz et Barrington, 1969].

A cet égard, une question qu'il conviendrait d'étudier plus avant est celle des phénomènes paramétriques dans le plasma ionosphérique. Cette question suscite actuellement un intérêt considérable et une étude spéciale pourrait lui être utilement consacrée [Tzoar, 1969].

Un autre type de brouillage est dû à des émissions d'ondes myriamétriques en provenance du sol, qui peuvent se propager jusqu'au satellite selon le mode sifflement, surtout pendant la nuit [Bullough et autres, 1971]. D'après les observations, l'intensité des signaux semble dépendre de la latitude, de l'absorption dans la région D et de la structure de la région F, mais il y a lieu de poursuivre les études à ce sujet.

7. Résonances observées au moyen de sondeurs ionosphériques

Les sondeurs ionosphériques installés à bord de fusées ou de satellites émettent de brèves impulsions en ondes radioélectriques et enregistrent la réponse subséquente de l'ionosphère, qui parvient au récepteur radioélectrique équipant l'engin spatial [Knecht et autres, 1961; Warren, 1962]. On observe ainsi des signaux discrets ou des résonances, qui peuvent persister pendant une durée allant d'une fraction d'une milliseconde à un grand nombre de millisecondes après la fin de l'émission de l'impulsion. Ces résonances se produisent et sont prévisibles le plus souvent quand la fréquence d'émission est voisine de la fréquence locale du plasma, f_N, de la

fréquence du bruit local à résonance hybride supérieure, f_T, et de son harmonique, $2f_T$, et des harmoniques de la gyrofréquence des électrons, nf_H [Lockwood, 1963; Calvert et Goe, 1963]. Dans une portion inférieure du spectre, on peut trouver d'autres réponses assimilables à des résonances, qui sont dans un rapport fractionnel avec une ou plusieurs des résonances principales du plasma ambiant [Hartz et Barrington, 1969], sur des fréquences correspondant aux résonances électrostatiques, ou résonances de Bernstein, du milieu local [Warren et Hagg, 1968] et sur une fréquence qui correspond à $2f_H$ dans une zone de l'ionosphère éloignée de l'engin spatial [Muldrew et Hagg, 1966]. Parfois, notamment lors de perturbations des conditions ionosphériques, l'émetteur du sondeur étant au repos, on peut observer plusieurs de ces résonances sur les enregistrements du récepteur [Hartz, 1969a; Mosier et autres, 1973]. Des résonances ont été observées aussi quand les impulsions sont émises sur une fréquence fixe et que le récepteur est commandé en balayage de fréquence [Lockwood, 1973]. Quand on réalise l'électronique d'un engin spatial, on pourra être amené à tenir compte de ces diverses réponses en résonance.

Sur les ionogrammes d'Alouette-2, Matuura et Nishizaki [1969] ont découvert des échos, appelés «échos cyclotrons de protons», que l'on peut attribuer à l'interaction de signaux impulsifs répétés émis par le sondeur en contre-haut avec le plasma ionosphérique qui entoure l'engin spatial. Le temps qui s'écoule entre l'émission d'une impulsion et la réception de ses échos est égal au temps de gyration des protons autour du champ magnétique à l'emplacement du satellite, et il ne dépend pas de la fréquence des ondes émises.

Maintes caractéristiques des résonances principales peuvent s'expliquer par la théorie de la propagation des ondes électrostatiques [McAfee, 1968; 1969a; 1969b, 1970; Muldrew, 1972a, 1972b]. Les ondes électrostatiques émises sous incidence oblique, à des fréquences ayant plusieurs kilohertz d'écart avec la fréquence du plasma ou avec la fréquence hybride haute, se propagent à de courtes distances de l'engin spatial et sont réfléchies par le milieu ionisé vers ce dernier, où elles arrivent au bout d'un certain temps de propagation de groupe sous la forme d'un signal. Comme ce temps de propagation est extrêmement sensible à la fréquence, le spectre de fréquences sur lequel une impulsion est émise peut donner lieu à des échos dont les temps de propagation diffèrent largement, et le signal ainsi formé constitue dans le récepteur une réponse de longue durée. D'autres résonances peuvent être dues à des effets non linéaires prenant naissance dans le plasma local [Hartz et Barrington, 1969], aux bandes latérales accompagnant l'impulsion à sa sortie de l'émetteur [Lockwood, 1973] et, pour certaines résonances éloignées, à la production d'ondes électrostatiques qui se convertiraient ultérieurement en un rayonnement électromagnétique, dont l'énergie se propagerait sous cette nouvelle forme [Oya, 1971].

8. Conclusions

Le présent Rapport traite principalement du bruit observé sur des fréquences inférieures à la fréquence critique de l'ionosphère; bien que le bruit cosmique puisse être extrapolé vers des fréquences plus élevées (Rapport 322 du CCIR et [Andrew, 1966]), le bruit causé par les décharges orageuses et les sources de bruit artificiel au sol devra être pris en considération, probablement jusqu'à une fréquence atteignant environ 500 MHz, selon les caractéristiques des antennes. Le bruit imputable à la non-linéarité des caractéristiques du plasma exige encore des études bien plus poussées. Les mesures de bruit effectuées actuellement par un certain nombre de satellites devraient fournir des renseignements complémentaires. Il y aurait lieu d'analyser aussi la turbulence causée dans le plasma ionosphérique par les véhicules qui s'y déplacent. De façon générale, la question de la cinétique des plasmas et de la génération du bruit devrait faire l'objet de recherches plus étendues et plus approfondies.

Note. — Ce Rapport a été établi d'après des contributions reçues de l'URSI.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKSENOV, V. I., DOUBINSKÏ, B. A., JEKOULINE, L. A., KISELEVA, Z. Y., LICHINE, I. V., MAKAROV, V. A. et MIKHAÏLOV, L. N. [1970] Propagation des ondes ultra-longues à travers l'ionosphère: résultats préliminaires obtenus avec le satellite Cosmos 142 (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **8**, 571.

ALEXANDER, J. K., BROWN, L. W., CLARK, T. A., STONE, R. G. et WEBBER, R. R. [1969a] The spectrum of the cosmic radio background between 0.4 and 6.5 MHz. *Astrophys. J.* (Lett.), Vol. 157, L163.

ALEXANDER, J. K., MALITSON, H. H. et STONE, R. G. [1969b] Type III radio bursts in the outer corona. *Solar Phys.*, **8**, 388-397.

ALEXANDER, J. K. et STONE, R. G. [1965] Rocket measurements of cosmic-noise intensities below 5 Mc/s. *Astrophys. J.*, Vol. 142, 1327-1332.

ANDREW, B. H. [1966] The spectrum of low radio frequency background radiation. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, Vol. 132, 79-86.

BARRINGTON, R. E. et HARTZ, T. R. [1968] Satellite ionosonde records: resonances below the cyclotron frequency. *Science*, Vol. 160, **3824**, 181-183.

BARRINGTON, R. E. et HARTZ, T. R. [1969] Resonances observed by the Alouette topside sounders. *Plasma waves in space and in the laboratory*, 55. Ed. J. O. Thomas and B. J. Landmark Edinburgh University Press, Edinburgh, Royaume-Uni.

BARRINGTON, R. E., HARTZ, T. R. et HARVEY, R. W. [1971] Diurnal distribution of ELF, VLF and LF noise at high latitudes as observed by Alouette II. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 5278-5291.

BAUER, S. J. et STONE, R. G. [1968] Satellite observations of radio noise in the magnetosphere. *Nature*, Vol. 218, 1145-1147.

BENEDIKTOV, E. A., GETMANTSEV, G. G., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O., SAZONOV, J. A. et TARASOV, A. F. [1965] Mesures de l'intensité des rayonnements aux fréquences 725 et 1525 kHz au moyen des récepteurs du satellite Electron-2 (en russe). *Recherches sur l'espace cosmique* (Conférence fédérale sur la physique de l'espace cosmique, Moscou, 581-606).

BENEDIKTOV, E. A., GETMANTSEV, G. G., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O. et TARASOV, A. F. [1968a] Sursauts solaires de type III enregistrés par le satellite Electron 4 (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **6**, 950.

BENEDIKTOV, E. A., GETMANTSEV, G. G., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O. et TARASOV, A. F. [1968b] Relation entre l'activité géomagnétique et l'émission radioélectrique sporadique enregistrée par les satellites Electron (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **6**, 946.

BENEDIKTOV, E. A., GETMANTSEV, G. G., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O. et TARASOV, A. F. [1969] Variations du niveau moyen des émissions à 1,1 et 2,3 MHz d'après les résultats de mesure fournis par le satellite Electron-4 (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **7**, 156.

BENSON, R. F. [1975] Source mechanism for terrestrial kilometric radiation. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 2, **2**, 52-55.

BOURENINE, A. N., GETMANTSEV, G. G., MITYAKOV, N. A., RAPOPORT, V. O., SIZMINE, A. M. et TYOUKINE, V. N. [1968] Intensité du rayonnement à 1,68 MHz mesurée par Cosmos 142 (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **6**, 313.

BRICE, N. M. et SMITH, R. L. [1964] A very-low-frequency plasma resonance. *Nature*, Vol. 203, **4948**, 926-927.

BROWN, L. W. [1973] The galactic radio spectrum between 130 and 2600 kHz. *Astrophys. J.*, Vol. 180, 359-370.

BUDDEN, K. G. [1961] *Radio waves in the ionosphere*, 59. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

BULLOUGH, K., SAGREDO, J. L., HUGHES, A. R. W. et KAISER, T. R. [1971] Ariel 3 observations of the GBR (16 kHz) wavefield above the winter night-time ionosphere. *Space Research XI*, 1305-1312.

CALVERT, W. et GOE, G. B. [1963] Plasma resonances in the upper ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 6113-6120.

CHAPMAN, J. H. [1961] Effects of the ionosphere on radio noise measurements from an earth satellite. *Space Research II*, 597, (Ed. H. C. van de Hulst, C. de Jager and A. F. Moore) North-Holland Publ. Co., Amsterdam, Pays-Bas.

CLARK, T. A., BROWN, L. W. et ALEXANDER, J. K. [1970] Spectrum of the extragalactic background radiation at low radio frequencies. *Nature*, Vol. 228, 847-848.

DUNCKEL, N., FICKLIN, B., RORDEN, L. et HELLIWELL, R. A. [1970] Low-frequency noise observed in the distant magnetosphere with OGO 1. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, **10**, 1854-1862.

DUNCKEL, N. et HELLIWELL, R. A. [1969] Whistler-mode emissions on the OGO 1 satellite. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, **26**, 6371-6385.

ELLIS, G. R. A., WATERWORTH, M. D. et BESSELL, M. [1962] Spectrum of the galactic radio emission between 10 Mc/s and 1.5 Mc/s. *Nature*, Vol. 196, **4859**, 1079.

ENGLISH, H. W. et HUGHES, A. R. W. [1974] An attempt to explain satellite observations of high latitude VLF hiss in terms of generation by incoherent Cerenkov radiation. *Space Research XIV*, 359-367.

FAINBERG, J., EVANS, L. G. et STONE, R. G. [1972] Radio tracking of solar energetic particles through interplanetary space. *Science*, Vol. 178, **4063**, 743-744.

FRANKEL, M. S. [1973] LF radio noise from the Earth's magnetosphere. *Radio-Sci.*, Vol. 8, **11**, 991-1005.

FREDRICKS, R. W. et SCARF, F. L. [1973] Recent studies of magnetospheric electric field emissions above the electron gyro-frequency. *J. Geophys. Res.* (Lett.), Vol. 78, **1**, 310-314.

GETMANTSEV, G. G., KARAVANOV, V. S., KOROBKOV, Y. S. et TARASOV, A. F. [1968] Spectre du rayonnement cosmique réparti entre 6,3 et 40 MHz (en russe). *J. d'Astronomie*, **45**, 936.

GREGORY, P. C. [1969] Radio emission from auroral electrons. *Nature*, Vol. 221, 350.

GREGORY, P. C. [1971] Satellite observations of magnetospheric radio noise-1. Emissions between the plasma and upper hybrid resonance frequencies. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 19, 813-820.

GRIGORIEVA, V. P. et SLYSH, V. I. [1970] Rayonnement cosmique à très basse fréquence dans l'espace circumlunaire (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **8**, 284.

GURNETT, D. A. [1966] A satellite study of VLF hiss. *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, 5599-5615.

GURNETT, D. A. [1974] The Earth as a radio source: terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, **28**, 4227-4238.

GURNETT, D. A. [1975] The Earth as a radio source: the non-thermal continuum. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 2751-2763.

GURNETT, D. A. et FRANK, L. A. [1972] VLF hiss and related plasma observations in the polar magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 172-190.

GURNETT, D. A. et FRANK, L. A. [1976] Continuum radiation from low-energy electrons in the outer radiation zone. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 3875-3885.

GURNETT, D. A. et SHAW, R. R. [1973] Electromagnetic radiation trapped in the magnetosphere above the plasma frequency. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 8136-8149.

HADDOCK, F. T. et GRAEDEL, T. E. [1970] Dynamic spectra of Type III solar burst from 4 to 2 MHz observed by OGO III. *Astrophys. J.*, Vol. 160, 293-300.

HAGG, E. L. [1967] Electron densities of 8-100 electrons/cm^3 deduced from Alouette II high latitude ionograms. *Can. J. Phys.*, Vol. 45, 27-36.

HAGG, E. L., HEWENS, E. J. et NELMS, G. L. [1969] The interpretation of topside sounder ionograms. *Proc. IEEE*, Vol. 57, **6**, 949-960.

HAKURA, Y., NISHIZAKI, R. et TAO, K. [1969] Analysis of observational data obtained by Alouette II. IV Galactic noise spectrum and solar radio bursts in hecto-decametric wave region. *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 16, **87/88**, 215-226.

HAKURA, Y., NISHIZAKI, R., TAO, K. et YAMASHITA, F. [1970] Results of special observations for the Proton Flare Project 1969. III. Observation of solar radio bursts by satellite Alouette II during the PFP interval May-July, 1969. *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 17, **89**, 21-32.

HARTZ, T. R. [1964a] Observations of the galactic radio emission between 1.5 and 10 MHz from the Alouette satellite. *Ann. Astrophys.*, Vol. 27, 823-830.

HARTZ, T. R. [1964b] Solar noise observations from the Alouette satellite. *Ann. Astrophys.*, Vol. 27, 831-836.

HARTZ, T. R. [1967] Satellite observations of ionospheric radio noise. *Progress in Radio Science*, URSI, 1963-1966, 1109.

HARTZ, T. R. [1969a] Radio noise levels within and above the ionosphere. *Proc. IEEE*, Vol. 57, **6**, 1042-1050.

HARTZ, T. R. [1969b] Type III solar radio bursts at hectometer wavelengths. *Planet. and Space Science*, Vol. 17, 267-287.

HARTZ, T. R. [1971] Particle precipitation patterns. *The Radiating Atmosphere*, 225. Ed. B. M. McCormac, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

HARTZ, T. R. et BARRINGTON, R. E. [1969] Nonlinear plasma effects in the Alouette recordings. *Proc. IEEE*, Vol. 57, **6**, 1108-1113.

HARTZ, T. R. et ROGER, R. S. [1964] The effective antenna beam width for a satellite-borne radio telescope. *Can. J. Phys.*, Vol. 42, 2146-2152.

HARVEY, C. C. [1965] Results from the UK-2 satellite. *Ann. Astrophys.*, Vol. 28, 248-254.

HARVEY, C. C. [1968] Radio emission from geomagnetically trapped particles. *Nature*, Vol. 217, **5123**, 50-51.

HERMAN, J. R. [1974] Earth as a planetary radio noise source. Final Report on Contract NAS5-24007-Mod 4 (Avco Corp., 201 Lowell St., Wilmington, MA 01887, Etats-Unis d'Amérique).

HERMAN, J. R., CARUSO, J. A. et STONE, R. G. [1973] Radio Astronomy Explorer (RAE)-I. Observations of terrestrial radio noise. *Planet. and Space Science.*, Vol. 21, **3**, 443-461.

HERMAN, J. R., STONE, R. G. et CARUSO, J. A. [1975] Radio detection of thunderstorm activity with an Earth-orbiting satellite. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 665-672.

HOFFMAN, R. A. et LAASPERE, T. [1972] Comparison of very low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from two OGO 4 experiments. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 640-650.

HORNER, F. [1965] Radio noise in space originating in natural terrestrial sources. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 13, 1137-1150.

HORNER, F. et BENT, R. B. [1969] Measurement of terrestrial radio noise. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 311, 527-542.

HUGHES, A. R. W. et KAISER, T. R. [1971] VLF radio emissions and the aurora. *The Radiating Atmosphere.* 336. Ed. B. M. McCormac. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

HUGHES, A. R. W., KAISER, T. R. et BULLOUGH, K. [1971] The frequency of occurrence of VLF radio emissions at high latitudes. *Space Research XI*, 1323-1330.

HUGUENIN, G. R., LILLEY, A. E., McDONOUGH, W. H. et PAPAGIANNIS, M. D. [1964] Measurements of radio noise at 0.7 and 2.0 Mc/s from a high-altitude rocket probe. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 12, 1157-1167.

HUGUENIN, G. R. et PAPAGIANNIS, M. D. [1965] Spaceborne observations of radio noise from 0.7 to 7.0 MHz and their dependence on the terrestrial environment. *Ann. Astrophys.*, Vol. 28, 239-247.

JAMES, H. G. [1973a] Spin modulation of high-latitude hiss measured by an electric dipole. *Radio Sci.*, Vol. 8, **12**, 1133-1147.

JAMES, H. G. [1973b] Whistler-mode hiss at low-and medium-frequencies in the dayside-cusp ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 4578-4599.

JAMES, H. G., HAGG, E. L. et STRANGE, D. L. P. [1973] Narrow-band radio noise in the topside ionosphere. Proc. AGARD Conference on Non-Linear Effects in Electromagnetic Wave Propagation.

JØRGENSEN, T. S. [1968] Interpretation of auroral hiss measured on OGO 2 and at Byrd Station in terms of incoherent Cerenkov radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 1055-1069.

KAISER, M. L. et STONE, R. G. [1975] Earth as an intense planetary radio source: similarities to Jupiter and Saturn. *Science*, Vol. 189, 285-287.

KENNEL, C. F., SCARF, F. L., FREDRICKS, R. W., McGEHEE, J. H. et CORONITI, F. V. [1970] VLF electric field observations in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6136-6152.

KNECHT, R. W., VANZANDI, T. E. et RUSSEL, S. [1961] First pulsed radio soundings of the top side of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3078-3081.

KOTAKI, M., KURIKI, I., KATOH, C. et SUGLIUGHI, H. [1981] Cosmic noise observation at high radio frequencies as observed with ISS-b. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 28, **125-126**, 35-48.

KURTH, W. S., BAUMBACK, M. M. et GURNETT, D. A. [1975] Direction-finding measurements of auroral kilometric radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 2764-2770.

LAASPERE, T., JOHNSON, W. C. et SEMPREBON, L. C. [1971] Observations of auroral hiss, LHR noise and other phenomena in the frequency range 20 Hz-540 kHz on OGO 6. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 4477-4492.

LEGG, A. J. et NEWMAN, W. S. [1967] The reception of ground-based loran transmissions by the fixed-frequency topside sounder satellite. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 29, 1383-1386.

LEIPHART, J. P., ZEEK, R. W., BEARCE, L. S. et TOTH, E. [1962] Penetration of the ionosphere by very-low-frequency radio signals – Interim results of the LOFTI I experiment. *Proc. IRE*, Vol. 50, Part I, **6**.

LIM, T. L. et LAASPERE, T. [1972] An evaluation of the intensity of Cerenkov radiation from auroral electrons with energies down to 100 eV. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 4145-4157.

LOCKWOOD, G. E. K. [1963] Plasma and cyclotron spike phenomena observed in top side ionograms. *Can. J. Phys.*, Vol. 41, 190-194.

LOCKWOOD, G. E. K. [1973] Side band and harmonic radiation from top side sounders. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 2244-2250.

MAEDA, K. [1973] VLF hiss from electrons in the Earth's magnetosphere. Rep. X-646-73-111. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., Etats-Unis d'Amérique.

MALITSON, H. H., FAINGERG, J. et STONE, R. G. [1973] A density scale for the interplanetary medium from observations of a Type II solar radio burst out to 1 A.U. *Astrophys. J.*, (Lett)., Vol. 183, L35.

MATUURA, N. et NISHIZAKI, R. [1969] Proton cyclotron echoes in the top side ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 5169-5172.

McAFEE, J. R. [1968] Ray trajectories in an anisotropic plasma near plasma response. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 5577-5584.

McAFEE, J. R. [1969a] Top side resonances as oblique echoes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 802-808.

McAFEE, J. R. [1969b] Top side ray trajectories near the upper hybrid resonance. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 6403-6408.

McAFEE, J. R. [1970] Top side plasma frequency resonance below the cyclotron frequency. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 4287-4290.

McEWEN, D. J. et BARRINGTON, R. E. [1967] Some characteristics of the lower hybrid resonance noise bands observed by the Alouette I satellite. *Can. J. Phys.*, Vol. 45, 13-19.

McILWAIN, C. E. [1961] Co-ordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3681-3691.

MOSIER, S. R., KAISER. M. L. et BROWN, L. W. [1973] Observations of noise bands associated with the upper hybrid resonance by the IMP-6 radio astronomy experiment. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, 1673.

MULDREW, D. B. [1965] F layer ionization troughs deduced from Alouette data. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 2635-2650.

MULDREW, D. B. [1972a] The electrostatic resonances associated with the maximum frequencies of cyclotron harmonic waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 1794-1801.

MULDREW, D. B. [1972b] Electron resonances observed with top side sounders. *Radio Sci.*, Vol. 7, 779-789.

MULDREW, D. B. et HAGG, E. L. [1966] A novel ionospheric cyclotron resonance phenomenon observed on Alouette I data. *Can. J. Phys.*, Vol. 44, 925-939.

MULDREW, D. B., LITWACK, M. D. et TIMLECK, P. L. [1967] Interpretation of the statistics of occurrence of Alouette-1 earth echoes. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 15. 611-618.

OELBERMAN, E. J. [1964] Expected radio noise levels in the upper atmosphere from 100 cps to 100 kMc/s. IEEE International Convention Record, **12**, Partie 6, 331.

ONDOH, T., NAKAMURA, Y., WATANABE, S., AIKYO, K. et MURAKAMI, T. [1983] Plasmaspheric hiss observed in the topside ionosphere at mid-and low-latitudes. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 31, **4**, 411-422.

ONDOH, T., NAKAMURA, Y., WATANABE, S. et MURAKAMI, T. [1980] Narrow-band VLF hiss observed in the vicinity of the plasmapause. *J. Radio Res. Labs.*, (Japon), Vol. 27, **124**, 131-139.

ONDOH, T., WATANABE, S., NAKAMURA, Y. et MURAKAMI, T. [1981] Riser emissions observed in mid-latitudes by ISIS satellites, US-Japon seminar on Wave-Particle Interactions in Space Plasmas. 40-44, Kyoto, Japon.

OYA, H. [1971] Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: Numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths. *Radio Sci.*, Vol. 6, **12**, 1131-1141.

RAWER, K. [1967] Noise produced by terrestrial sources in the near-earth space, dans *Propagation Factors in Space Communications*, 383-408. Ed. W. T. Blackband, McKay Co., Londres, Royaume-Uni.

SHAW, R. R. et GURNETT, D. A. [1975] Electrostatic noise bands associated with the electron gyro-frequency and plasma frequency in the outer magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, 4259-4271.

SHAWHAN, S. D. et GURNETT, D. A. [1968] VLF electric and magnetic fields observed with the Javelin 8.45 rocket experiment. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 5649-5664.

SLYSH, V. E. [1965] Mesure du rayonnement cosmique aux fréquences 210 et 2200 kHz à des altitudes allant jusqu'à 8 rayons terrestres à bord de Zond 2 (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **3**, 760.

SLYSH, V. E. [1966] Mesure des émissions radioélectriques en ondes kilométriques dans l'espace interplanétaire (en russe). *J. de recherche cosmique*, URSS, **6**, 923.

SLYSH, V. E. [1967] Emissions radioélectriques solaires à 2 et 0,2 MHz (en russe). *J. d'Astronomie*, **44**, 94.

SMITH, F. G. [1965] Cosmic radio noise as measured in the satellite Ariel II; Part II, Analysis of the observed sky brightness. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, Vol. 131, 145-153.

SMITH, P. A. [1975] Cerenkov relations between r.f. noise and energetic particles on Ariel 4. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 343A, 241-255.

STIX, T. H. [1962] *The Theory of Plasma Waves.* McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

STONE, R. G. [1973] Radio physics of the outer solar system. *Space Sci. Rev.*, Vol. 14, 534-551.

TAYLOR, W. W. L. et SHAWHAN, S. D. [1974] A test of incoherent Cerenkov radiation for VLF hiss and other magnetospheric emissions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 105-117.

THORNE, R. M., SMITH, E. J., BURTON, R. et HOLZER, R. E. [1973] Plasmaspheric hiss. *J. Geophys. Res.*, VOL. 78, 1581.

TZOAR, N. [1969] Parametric excitations in plasma in a magnetic field. *Phys. Rev.*, Vol. 178, **1**, 356-362.

WALSH, D., HADDOCK, F. T. et SHULTE, H. F. [1964] Cosmic radio intensities at 1.225 and 2.0 Mc/s measured up to an altitude of 1700 km. *Space Research IV*, 935. Ed. P. Muller, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, Pays-Bas.

WALSH, D., HAYES, A. P. et HARRISON, V. A. W. [1975] Observations of radio frequency noise from Ariel 4. *Proc. Roy. Soc.*, Vol. 343A, 227-240.

WARREN, E. S. [1962] Sweep frequency radiation sounding of the top side of the ionosphere. *Can. J. Phys.* (Lett.), Vol. 40, 1692.

WARREN, E. S. et HAGG, E. L. [1968] Observation of electrostatic resonances of the ionospheric plasma. *Nature*, Vol. 220, 466-468.

WHITTEKER, J. H., BRACE, L. H., BURROWS, J. R., HARTZ, T. R., HEIKKILA, W. J., SAGALYN, R. C. et THOMAS, D. M. [1972] ISIS I observations of the high-latitude ionosphere during a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 6121-6128.

RAPPORT 254-6

MESURES DU BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ATMOSPHÉRIQUE ENGENDRÉ PAR LES ÉCLAIRS

(Programme d'études 29B/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Mesures du bruit et résultats obtenus

Une longue série de mesures du bruit a débuté en 1957, avec du matériel normalisé (ARN-2) et un réseau de stations de mesure réparties dans le monde entier [Crichlow et autres, 1959-67]. Chaque station a mesuré la puissance du bruit, (facteur de bruit équivalent à l'antenne, Rapports 670 et 322), certaines d'entre elles étant équipées d'un matériel supplémentaire en vue de mesurer des caractéristiques additionnelles permettant de décrire la structure du bruit. Un compte rendu de cette campagne de mesures a été établi et publié par l'URSI [1962]. La communication régulière des résultats au Centre de rassemblement de données de Boulder (Colorado, Etats-Unis d'Amérique) n'est actuellement plus assurée. On dispose cependant aujourd'hui de renseignements suffisants pour procéder à une révision approfondie du Rapport 322 qui repose sur des données antérieures à 1963. Les résultats qu'ont fournis de très nombreuses stations de mesure couvrent à l'heure actuelle la durée totale d'un cycle de l'activité solaire. L'URSI estime que les données contenues dans le Rapport pourraient être considérablement améliorées, mais l'intérêt scientifique d'une telle révision ne justifie pas pleinement que ce travail soit effectué [CCIR, 1970-74a].

On a observé certains écarts systématiques, atteignant 4 dB sur certaines fréquences, entre les valeurs de la puissance du bruit obtenues en un même lieu par différentes techniques.

Les relevés de mesures en ondes décamétriques amènent à penser que les données du Rapport 322 relatives au jour sont trop faibles pour certaines régions tropicales [CCIR, 1963-66a, b, c; CCIR, 1966-69a]. Les écarts peuvent atteindre 10 dB et même plus dans la partie inférieure de la bande des ondes décamétriques, aussi ces régions devront-elles être l'objet d'un examen particulier lors de la révision du Rapport. Il faudra aussi prendre en considération d'autres résultats publiés, qui ont été fournis par des comparaisons entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées du bruit [Herman, 1961; Ibukun, 1964].

Les résultats d'une étude spéciale du bruit atmosphérique en ondes myriamétriques ont été publiés sous forme de cartes et de courbes [Watt, 1967]. On dispose aussi d'autres résultats portant sur cette même gamme ainsi que sur une gamme d'ondes encore plus longues [Maxwell, 1967; Remizov et autres, 1971]. Il convient de signaler en outre des travaux visant à la mise au point d'un modèle perfectionné de prévision du bruit sur ondes myriamétriques [CCIR, 1970-74a].

Dans un document présenté par l'Inde [Aiya, 1979], il est indiqué que dans les pays tropicaux, le bruit atmosphérique sur ondes métriques revêt une importance pratique. Ce document contient des données qui devraient être utiles aux ingénieurs chargés de réaliser des systèmes de communications à ondes métriques dans les régions tropicales.

2. Caractéristiques statistiques du bruit

On a effectué des mesures de la répartition de probabilité des amplitudes du bruit en de nombreux points [URSI, 1962] et les résultats ont été utilisés dans le Rapport 322. On a constaté que, lors de l'estimation des rapports signal/bruit requis, il est possible de tenir compte de la structure du bruit.

A la suite de mesures faites en Inde au cours des vingt dernières années, on a obtenu des données statistiques du bruit pour la bande 5 (ondes kilométriques), la bande 6 (ondes hectométriques) et la bande 7 (ondes décamétriques). Ces données sont fondées sur une technique qui insiste sur l'importance des pointes de bruit qui constituent la source principale de brouillage dû au bruit et causé à de nombreux services. On a étudié l'influence du bruit sur les communications téléphoniques, la radiodiffusion et la transmission des données [CCIR, 1966-69b; URSI, 1981; Spaulding, 1981]. On possède quelques renseignements sur les variations statistiques du bruit à court terme et à long terme [Crichlow et autres, 1960; Remizov et autres, 1967; Watt, 1967; Watt et Maxwell, 1957; Spaulding et autres, 1962]. Remizov [1977] ainsi que Remizov et autres [1979] ont examiné des méthodes permettant d'obtenir les caractéristiques du bruit atmosphérique à large bande à partir de mesures faites dans une bande étroite.

Les résultats de mesures des caractéristiques statistiques d'amplitude et de durée du bruit, ainsi que de travaux portant sur le modèle mathématique de ces caractéristiques ont été communiqués par Disney et Spaulding [1970]. Spaulding et Middleton [1975], Spaulding [1977] et Middleton [1979] ont donné un sommaire de nombreux modèles mathématiques du processus de bruit atmosphérique. Bolton [1971] a en outre décrit certaines tentatives de réalisation d'appareils de laboratoire destinés à simuler le bruit atmosphérique.

3. Mesures effectuées avec des antennes directives

On a effectué des mesures avec des antennes directives du type utilisé pour les communications sur ondes décamétriques à grande distance. On dispose de trop peu de données pour faire un rapport complet, mais les résultats de certaines recherches ont déjà été publiés [Kronjäger et Vogt, 1959; Bradley et Clarke, 1964] et le Rapport 322 contient des renseignements préliminaires à ce sujet. Par ailleurs, on trouve dans le doc. CCIR [1970-74b] des résultats de mesure plus récents obtenus au Canada.

4. Compteurs d'éclairs et réseaux de radiogoniométrie

Le but des observations faites au moyen de compteurs d'éclairs, pour autant qu'elles intéressent les études du bruit, est la détermination du nombre d'éclairs par unité de surface terrestre, en différents points et à des instants différents. Bien que l'extension des réseaux de compteurs se soit faite assez lentement, on a acquis de plus en plus d'expérience concernant leur utilisation et la comparaison entre le compteur du CCIR et les autres compteurs. Les renseignements provenant de compteurs d'un type adopté par la Conférence internationale des grands réseaux électriques (CIGRE), et dont on fait grand usage, peuvent être mis en corrélation avec ceux provenant de compteurs type CCIR, à condition que les sensibilités aient été réglées aux niveaux appropriés; des études ont été entreprises pour déterminer avec une meilleure précision la portée effective du compteur CIGRE [Frühauf et autres, 1966]. Des expériences faites avec un autre compteur fonctionnant au moyen de l'énergie radioélectrique des atmosphériques ont conduit à des conclusions analogues, en ce qui concerne l'influence des décharges, à celles tirées du compteur type CCIR.

On a déduit d'expériences faites au Royaume-Uni [Horner, 1960] et d'autres expériences décrites dans un document suédois [CCIR, 1963], différentes évaluations de la portée utile du compteur du CCIR; des expériences complémentaires sont nécessaires. Toutefois, on ne doit pas attendre une évaluation plus précise de cette portée pour recueillir d'autres résultats, qui permettront au moins d'obtenir les valeurs relatives pour différentes positions géographiques.

En Inde, on a mis au point un compteur d'éclairs fonctionnant dans la bande des ondes décamétriques; ce compteur est censé être peu encombrant, portatif et de prix modique; sa gamme de détection est bien définie [Aiya et Hari Shankar, 1969].

On a analysé les indications fournies par des compteurs d'éclairs du type recommandé par le CCIR et utilisés au Royaume-Uni et à Singapour. Les résultats de cette analyse, qui ont été publiés [Horner, 1967], sont accompagnés de comparaisons d'un intérêt particulier pour le CCIR entre les données fournies par les compteurs d'éclairs et celles provenant de mesures de bruit. Ces comparaisons illustrent les conditions dans lesquelles les évaluations des niveaux de bruit, fondées sur le nombre et les caractéristiques électriques connues des décharges orageuses, sont conformes ou non aux résultats des mesures directes du bruit mentionnées au § 1.

D'une façon générale, les deux séries de données coïncident assez étroitement lorsqu'on peut raisonnablement attribuer la plupart des bruits mesurés à des orages assez proches et assez nombreux pour produire une succession ininterrompue d'atmosphériques. Par contre, les conditions dans lesquelles on observe des divergences entre les résultats des deux méthodes d'évaluation sont les suivantes:

- aux fréquences de la bande des ondes myriamétriques, lorsqu'on compte moins de 30 décharges en une heure: le niveau du bruit mesuré est alors supérieur à la valeur calculée à partir des données fournies par le compteur. La différence est probablement due au fait que le bruit reçu provient d'une région plus étendue que celle pour laquelle on peut considérer comme représentatives les indications fournies par le compteur;
- aux fréquences de la bande des ondes hectométriques et de la partie inférieure de la bande des ondes décamétriques, lorsqu'on compte moins de 500 décharges en une heure; le niveau de bruit mesuré est alors inférieur – d'une valeur atteignant parfois 30 dB – à la valeur à laquelle on pourrait s'attendre d'après le nombre des décharges. Cette différence est probablement due au fait que l'échelle dynamique des appareils de mesure du bruit, bien qu'assez étendue, est encore trop limitée pour enregistrer la puissance moyenne des bruits les plus impulsifs.

Les erreurs affectant les mesures de bruit dans les bandes d'ondes hectométriques et décamétriques ne se produisent que pendant les orages locaux et lorsqu'on compte moins de 500 décharges en une heure. Elles n'affectent donc qu'une faible proportion des données publiées dans le Rapport 322. Il convient cependant de signaler que, dans la Zone tropicale, aussi bien la valeur médiane mensuelle mesurée que les déciles supérieur et inférieur des niveaux de bruit peuvent tous être erronés, selon l'intensité orageuse pendant le mois étudié. Les données figurant dans le Rapport 322 ne seront donc utilisées qu'avec prudence dans le cas de toute application où le bruit dû aux orages locaux joue un rôle important. Dans ces circonstances, et si l'on dispose d'un compteur d'éclairs, les indications de celui-ci sont sans doute préférables aux résultats des mesures d'intensité des bruits.

Il résulte donc de l'étude effectuée que les données fournies par les compteurs d'éclairs constituent au moins un supplément précieux aux résultats des mesures de bruit et servent à distinguer les niveaux élevés du bruit atmosphérique de celui causé par des brouillages.

Bien qu'on dispose d'un grand nombre de données provenant des réseaux de radiogoniométrie pour la détection des atmosphériques, on ne possède aucun rapport indiquant la manière dont on pourrait utiliser ces données pour l'étude du bruit. Les problèmes qui se posent sont considérables, mais étant donné que ces réseaux sont capables de fournir des renseignements qui pourraient donner des précisions sur le bruit produit dans les régions océaniques, où l'on ne peut pas établir des réseaux adéquats de compteurs d'éclairs, il convient d'envisager, dans un proche avenir, une étude portant sur le point de savoir si les possibilités offertes par ces réseaux sont réalisables en pratique.

On trouvera la description de travaux portant sur les résultats obtenus par radiogoniométrie dans le doc. CCIR [1963-66d] et un article d'Horner [1971].

5. Intensité et nature du bruit produit par des éclairs

Les atmosphériques dus aux orages proches ont été enregistrés de manière telle qu'il est possible de tenir compte des effets de la propagation et de déterminer le spectre d'énergie [Watt et Maxwell, 1957; Taylor et Jean, 1959; Horner, 1964; Horner et Bradley, 1964; Pierce, 1967] qui constitue, en fait, une caractéristique propre à la source considérée. On a utilisé le spectre, conjointement avec le compteur d'éclairs et les données de propagation, pour obtenir des estimations du bruit intégré en certains points [Horner, 1967]. Ces estimations ont été comparées avec les intensités de bruit mesurées et la concordance constatée justifie que l'on poursuive les études sur cette méthode.

6. Distribution mondiale des orages

Sur la base des rapports journaliers de l'activité orageuse établis par l'OMM, on a fait des estimations de la probabilité pour qu'un orage se produise en un point quelconque, pour chaque heure du jour et pour chacune des quatre saisons [Crichlow et autres, 1971].

Au moyen des quatre récepteurs d'ondes décamétriques installés à bord d'un satellite, on a tracé, toutes les six heures d'une journée (0000-0600, 0600-1200, 1200-1800, 1800-2400, heure locale) et pour les quatre saisons, une carte de la distribution mondiale de la fréquence des éclairs par 10° de latitude et de longitude [Kotaki et autres, 1981]. Les résultats pour l'intervalle de temps 1200-1800 pour l'été boréal (juin-août), sont représentés à la Fig. 1. On a aussi tracé, toutes les quatre heures (UTC) et pour les quatre saisons, une carte de la distribution mondiale de la fréquence des éclairs par 10° de latitude et de longitude [Kotaki et autres, 1981; RRL, 1981]. Une de ces cartes est représentée par la Fig. 2.

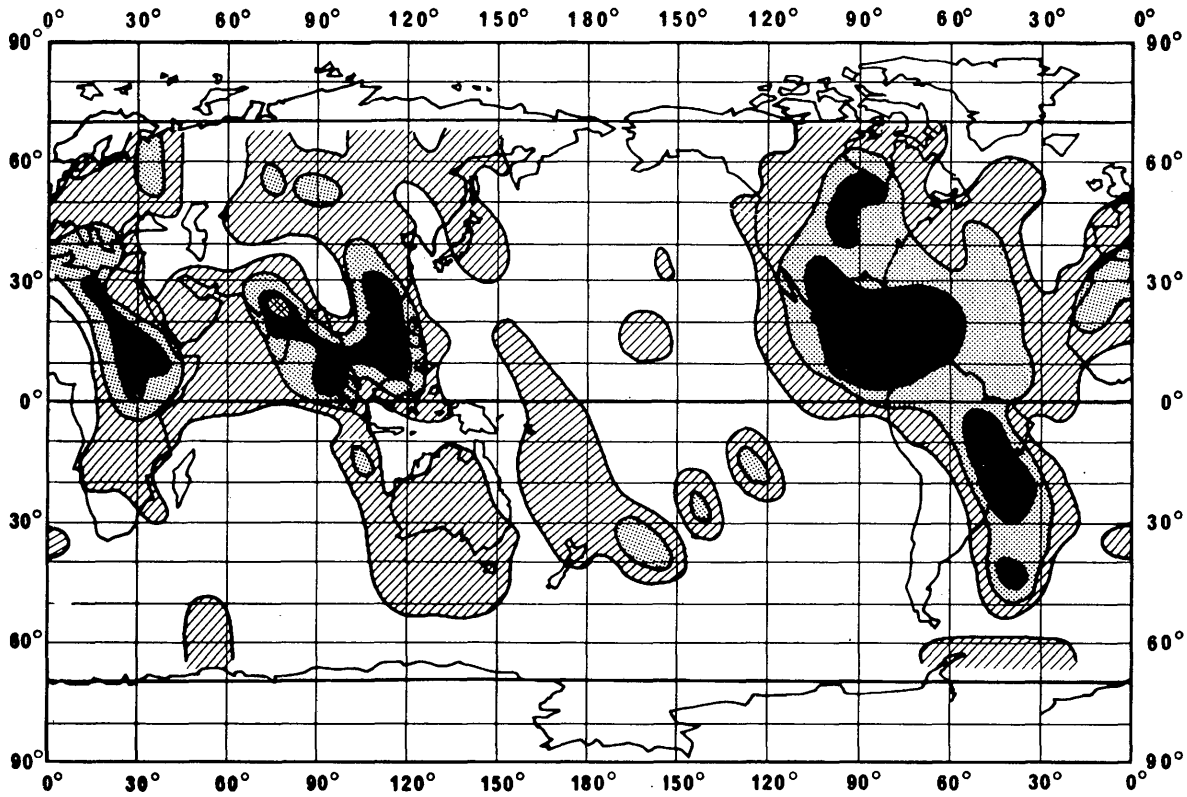


FIGURE 1 – *Taux d'occurrence des éclairs pendant l'été boréal juin-août 1978, 1200-1800 (heure locale)*

Fréquence d'occurrence/min:

- > 15
- 3-15
- 1,5-3
- 0,3-1,5
- < 0,3

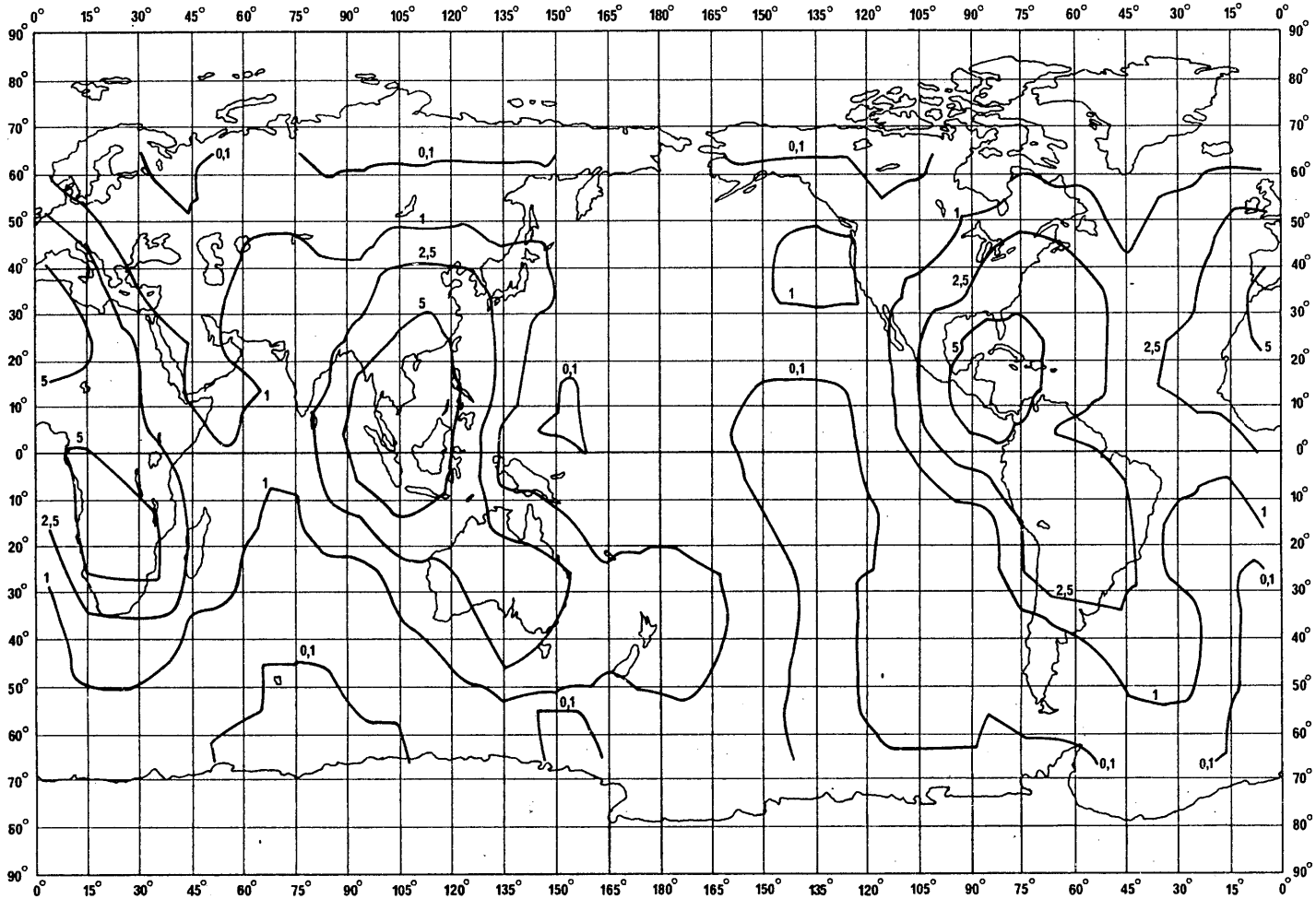


FIGURE 2a – *Distribution mondiale de la fréquence d'occurrence des décharges orageuses. Septembre, octobre, novembre: 2200-0200 h UTC*

(On obtient la fréquence des décharges orageuses se produisant par seconde sur une superficie de 100 km^2 en multipliant par 10^{-5} la valeur indiquée par les contours.)

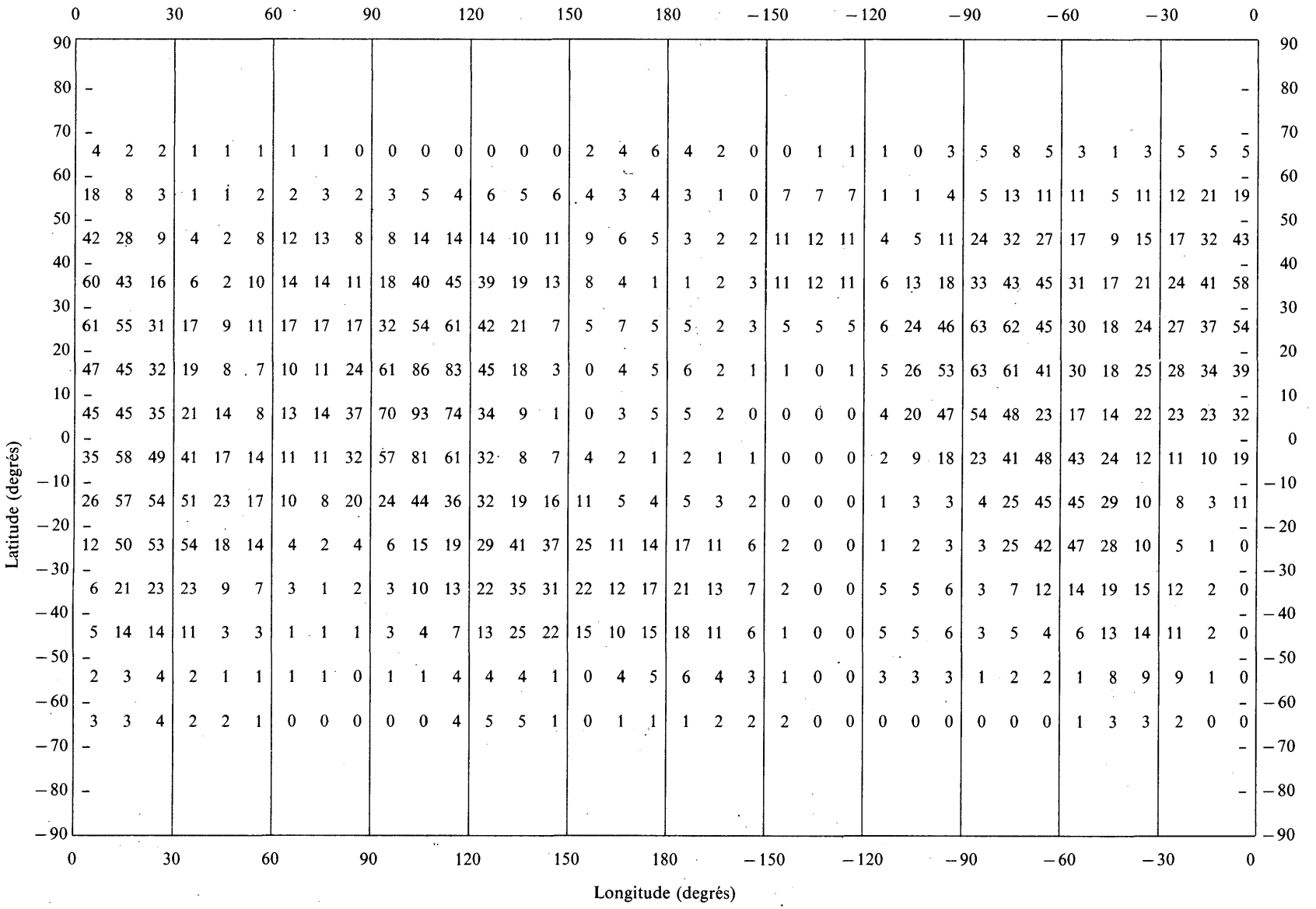


FIGURE 2b – *Carte numérique de la fréquence d'occurrence des décharges orageuses*
Septembre, octobre, novembre: 2200-0200 h UTC

(On obtient la fréquence des décharges orageuses se produisant par seconde sur une superficie de 100 km^2 en multipliant par 10^{-6} la valeur numérique)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIYA, S. V. C. [1979] Atmospheric noise data for tropical regions. *Radio Sci.*, Vol. 14, 1001-1010.

AIYA, S. V. C. et HARI SHANKAR, M. [1969] A lightning flash density gauge. *ITE J.*, XV, **10**.

BOLTON, E. [1971] Simulating atmospheric radio noise from low frequency through high frequency. *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 42, **5**, 574-577.

BRADLEY, P. A. et CLARKE, C. [1964] Atmospheric radio noise and signals received on directional aerials at high frequencies. *Proc. IEE*, Vol. 111, 1534-1540.

CRICHLOW, W. Q., DAVIS, R. C., DISNEY, R. T. et CLARK, M. W. [1971] Hourly probability of world-wide thunderstorm occurences. Telecommunications Research Report OT/ITS RR 12, US Dept. of Commerce, Washington, DC 20402.

CRICHLOW, W. Q., DISNEY, R. T. et JENKINS, M. A. [1959-67] Quarterly radio noise data. NBS Tech. Notes Nos. 18 and 18-2 to 18-26, and ESSA Tech. Reps. IER 18-27 to 18-32, Institute for Environmental Research, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique.

CRICHLOW, W. Q., SPAULDING, A. D., ROUBIQUE, C. J. et DISNEY, R. T. [1960] Amplitude probability distributions for atmospheric radio noise. NBS Monograph 23, Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

DISNEY, R. T. et SPAULDING, A. D. [1970] Amplitude and time statistics of atmospheric and man-made radio noise. ESSA Tech. Rep. ERL 150-ITS-98, US Dept. of Commerce, Washington, DC 20402.

FRÜHAUF, G., AMBERG, H. et WÜRSTER, W. [1966] Wirkungsweise und Reichweite von Blitzzählern (Fonctionnement et portée des compteurs d'éclairs). Beihefte (Supplément) der *ETZ*, **6**.

HERMAN, J. R. [1961] Reliability of atmospheric radio noise predictions. *NBS J. Res.*, Vol. 65D, **6**, 565-574.

HORNER, F. [1960] The design and use of instruments for counting local lightning flashes. *Proc. IEE*, Vol. 107B, 321-330.

HORNER, F. [1964] Radio noise from thunderstorms. *Advances in Radio Research*, **2**, 121. Ed. J. A. Saxton, Academic Press, Londres, Royaume-Uni.

HORNER, F. [1967] Analysis of data from lightning flash counters. *Proc. IEE*, Vol. 114, 916-924.

HORNER, F. [1971] Scientific activities of (URSI) Commission VIII. *Progress in Radio Science*, 1966-69, Part 1, 253-257, Gen. Ed. C. M. Minnis, URSI, Bruxelles, Belgique.

HORNER, F. et BRADLEY, P. A. [1964] The spectra of atmospherics from near lightning discharges. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 26, 1155-1166.

IBUKUN, O. [1964] Measurements of atmospheric noise levels. *Radio and Electron. Engr.*, Vol. 28, 405.

KOTAKI, M., KURIKI, I., KATOH, C. et SUGIUCHI, H. [1981] Global distribution of thunderstom activity observed with ISS-b, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 28, **125/126**, 49-71.

KRONJÄGER, W. et VOGT, K. [1959] Über das Aussengeräusch kommerzieller Antennenanlagen (Bruit externe des installations d'antennes commerciales). *NTZ*, Vol. 12, **7**, 371-373.

MAXWELL, E. L. [1967] Atmospheric noise from 20 Hz to 30 kHz. *Radio Sci.*, **2**, 637-644.

MIDDLETON, D. [1979] Canonical non-Gaussian noise models: their implications for measurements and prediction of receiver performance. *IEEE Trans. Electromagn. Compt.*, Vol. EMC-21, **3**, 209-220.

PIERCE, E. T. [1967] Atmospherics – their characteristics at the source, and propagation. *Progress in Radio Science*, 1963-66, Part. 1. Proc. XV, Assemblée générale de l'URSI.

REMIZOV, L. T. [1977] Relation entre les caractéristiques du bruit naturel aléatoire dans la gamme des ondes myriamétriques mesurées par enregistrement à bande étroite et à large bande (en russe). *Compte rendu de l'Académie des sciences de l'URSS*, Vol. 235, **2**, 306.

REMIZOV, L. T., OLEINIKOVA, I. V., KOROLIEV, A. N., VISKREVTOV, I. G. et TCHERNIAVSKY, A. F. [1971] Caractéristiques statistiques des bruits atmosphériques aux ondes myriamétriques (en russe). *Radiotekhnika i Elektronika*, **16**, 1191-1199.

REMIZOV, L. T., PASKUAL, A. G., APRAKSIN, L. B. [1979] Relation mutuelle des modèles statistiques des bruits atmosphériques lors de la réception à bande étroite et à bande large dans la gamme des ondes myriamétriques (en russe). *Radioteknika i Elektronika*, Vol. XXIV, **3**, 498-510.

REMIZOV, L. T., POTAPOV, A. V. et VIKHROV, B. R. [1967] Distribution de probabilité des intervalles de temps entre les bruits atmosphériques (en russe). *Radiotekhnika i Elektronika*, **12**, 706-708.

RRL [1981] World Distribution of Thunderstorm Activity Obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b Observations, June 1978 to May 1980. *Radio Res. Labs*, Japon.

SPAULDING, A. D. [1977] Stochastic modeling of the electromagnetic interference environment. IEEE International Conference on Communications (ICC '77), 12-15 juin, Chicago, Ill., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, 42.2-115 – 123 (IEEE Catalogue No. 77CH1209-6CSCB).

SPAULDING, A. D. [1981] Atmospheric Radio Noise and its Effects on Telecommunication Systems. *Handbook of Atmospherics*, Ch. 6, Ed. H. Volland, CRC Press, Boca Raton, Fla., Etats-Unis d'Amérique.

SPAULDING, A. D. et MIDDLETON, D. [1975] Optimum reception in an impulsive interference environment. OT Report 75-67, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

SPAULDING, A. D., ROUBIQUE, C. J. et CRICHLOW, W. Q. [1962] Conversion of the amplitude-probability distribution function for atmospheric radio noise from one bandwidth to another. *NBS J. Res.*, Vol. 66D, **6**, 713-720.

TAYLOR, W. L. et JEAN, A. G. [1959] Very low frequency radiation spectra of lightning discharges. *NBS J. Res.*, Vol. 63D, **2**, 199-204.

URSI [1962] The measurement of characteristics of terrestrial radio noise. Special Report No. 7, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.

URSI [1981] *Review of Radio Science* 1978-1981, E1-E13, Union radioscientifique internationale, Bruxelles, Belgique.

WATT, A. D. [1967] *VLF radio engineering.* Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WATT, A. D. et MAXWELL, E. L. [1957] Characteristics of atmospheric noise from 1 to 100 kc/s. *Proc. IRE*, Vol. 45, **6**, 787-794.

Documents du CCIR

[1963]: 183 (Suède).

[1963-66]: **a.** VI/79 (Inde); **b.** VI/201 (Inde); **c.** VI/202 (Inde); **d.** VI/67 (Rév.1) (Allemagne (République fédérale d')).

[1966-69]: **a.** VI/86 (Inde); **b.** VI/173 (Inde).

[1970-74]: **a.** 6/184 (URSI); **b.** 6/270 (Canada).

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 6N: CHAMP AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz

Recommandations et Rapports

RECOMMANDATION 533-1

ÉVALUATION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 2 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la méthode exposée dans le Rapport 252-2 a été recommandée en 1978 pour utilisation provisoire comme méthode informatique de prévision pour le champ de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 2 MHz;

b) que la méthode plus perfectionnée et plus complète exposée dans le Supplément au Rapport 252-2 a, depuis 1978, fait l'objet des programmes informatiques et qu'elle est disponible au Secrétariat,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que les renseignements figurant dans le Rapport 252-2 (New Delhi, 1970) soient utilisés à titre provisoire pour la prévision par méthode informatique du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 2 MHz, en attendant que son remplacement décrit dans le Supplément au Rapport 252-2 ait fait l'objet de vérifications supplémentaires.

RAPPORT 252-2

MÉTHODE PROVISOIRE DU CCIR POUR L'ÉVALUATION DU CHAMP ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE D'ESPACE POUR LES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE LES LIMITES APPROXIMATIVES DE 2 ET 30 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1956-1959-1963-1966-1970)

Ce Rapport fait l'objet d'une publication séparée.

SUPPLÉMENT AU RAPPORT 252-2

DEUXIÈME MÉTHODE INFORMATIQUE PROVISOIRE DU CCIR POUR L'ÉVALUATION DU CHAMP ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE POUR LES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 2 ET 30 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1978-1982)

Ce supplément au Rapport 252-2 fait l'objet d'une publication séparée. Ce supplément remplacera le Rapport 252-2 qui est toutefois maintenu en attendant que le supplément ait fait l'objet de vérifications supplémentaires.

RECOMMANDATION 621

CONSTANTES NUMÉRIQUES ET PROCÉDURE D'INTERPOLATION UTILISÉES DANS LA MÉTHODE DE PRÉVISION DE LA PROPAGATION DE LA CAMR HFBC

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (CAMR HFBC) a choisi une méthode de propagation de l'onde ionosphérique tirée du Rapport 894;

b) que la méthode de prévision adoptée par la première session de la CAMR HFBC doit être utilisée par l'IFRB entre les deux sessions de cette Conférence;

c) que le CCIR a été prié dans la Recommandation COM5/1 de réexaminer les valeurs numériques des constantes qui figurent dans les expressions de E_{ts} et E_{tl} et de fixer la procédure d'interpolation appropriée à utiliser pour la méthode de prévision adoptée par la première session;

d) que le Groupe de travail intérimaire 6/13 du CCIR a été chargé d'étudier les questions mentionnées au point *c)* ci-dessus et qu'il a achevé ses travaux,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. que la constante figurant dans l'expression de E_{ts} (dont il est question au § 3.2.1.3.1.3 du Rapport pour la seconde session de la CAMR HFBC) soit de 7,3 dB;

2. que la constante figurant dans l'expression de E_{tl} (dont il est question au § 3.2.1.3.2 du même Rapport) soit de $-3{,}9$ dB;

3. que la procédure d'interpolation du § 3.2.1.3.3 du Rapport soit conservée.

Note 1. – Pour garantir une utilisation correcte de ces constantes, (7,3) dB remplace (12,2) dB et $(-3{,}9)$ dB remplace (0,8) dB.

ANNEXE I

Le Rapport pour la seconde session de la CAMR HFBC, au § 3.2.1.3 relatif à la prévision du champ médian, comporte les équations figurant ci-dessous.

L'équation permettant de calculer la valeur médiane du champ pour un mode et pour des longueurs de trajet de 0 à 7000 km est la suivante (voir le § 3.2.1.3.1.3):

$$E_{ts} = 136{,}6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_{bf} - L_i - L_m - L_g - L_h - 12{,}2^{*} \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m})$$

L'équation permettant de calculer la valeur médiane du champ total pour des longueurs de trajet supérieures à 9000 km est la suivante (voir le § 3.2.1.3.2):

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left(\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right) \right]$$

$$- 36{,}4 + P_t + G_{tl} + G_{ap} - 0{,}8^{**} \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m})$$

La procédure d'interpolation pour des longueurs de trajet comprises entre 7000 et 9000 km (voir le § 3.2.1.3.3) est donnée par:

$$E_{ti} = E_{ts} + \frac{D - 7000}{2000} (E_{tl} - E_{ts}) \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m})^{***}$$

---

* Ce terme contient les effets de la propagation ionosphérique qui ne seraient pas inclus dans cette méthode simple. Une valeur de 12,2 dB est recommandée compte tenu des données disponibles. Toutefois, on note qu'il peut être nécessaire de modifier cette valeur lors de la mise en œuvre de cette procédure pour tenir compte des données étalonnées supplémentaires qui deviennent disponibles.

** Ce terme tient compte des effets de la propagation ionosphérique qui ne seraient pas inclus dans la méthode. Une valeur de 0,8 dB est recommandée compte tenu des données disponibles. Toutefois, on note qu'il peut être nécessaire de modifier cette valeur lors de la mise en œuvre de cette procédure pour tenir compte des données étalonnées supplémentaires qui deviennent disponibles.

*** Compte tenu des données qui deviennent disponibles, une autre forme d'interpolation peut être envisagée.

RAPPORT 894-1

MÉTHODE SIMPLE DE PRÉVISION DE LA MUF ET DU CHAMP POUR LA PROPAGATION DES ONDES DÉCAMÉTRIQUES

(Programme d'études 30A/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Cette méthode de prévision de la propagation en ondes décamétriques a été élaborée par le Groupe de travail intérimaire 6/12 du CCIR pour la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (CAMR HFBC), après examen d'une vingtaine de méthodes de prévision du champ utilisées par différentes organisations. Elle comprend les prévisions de la MUF et du champ médian. Pour les prévisions de l'évanouissement, du bruit et de la fiabilité, voir respectivement les Rapports 266, 322 et 892 du CCIR.

Cette méthode de prévision est une combinaison d'une méthode simplifiée décrite dans le Rapport 252 (pour des trajets de 0 à 7000 km) et de la méthode du FTZ conçue en République fédérale d'Allemagne (pour des trajets supérieurs à 9000 km), avec interpolation linéaire à partir des valeurs obtenues par les deux méthodes susmentionnées pour des trajets compris entre 7000 et 9000 km. La méthode de prévision de la MUF utilisée est celle qui figure dans le Rapport 340.

Cette méthode ne tient pas compte des détails du mécanisme de propagation, mais elle est simple et rapide pour les calculs et elle peut convenir pour l'exploitation des services en ondes décamétriques.

On établit actuellement un programme d'ordinateur pour cette méthode de prévision. On trouve des renseignements sur la disponibilité du programme d'ordinateur pour cette méthode dans la Résolution 63.

La méthode de prévision de la propagation approuvée par la CAMR HFBC est fondée sur cette méthode, mais avec des modifications (voir le Rapport à la seconde session de la CAMR HFBC, Genève, 1984).

2. Fréquences maximales utilisables de référence et d'exploitation

L'estimation de la MUF d'exploitation (fréquence la plus élevée qui permet d'assurer un service de radiocommunication de qualité acceptable) se fait en deux étapes: premièrement, l'estimation de la MUF de référence à partir de caractéristiques ionosphériques; deuxièmement, détermination d'un facteur de correction pour tenir compte des mécanismes de propagation aux fréquences supérieures à la MUF de référence.

2.1 *MUF de référence*

Pour des longueurs de trajet comprises entre 0 et 4000 km, on prévoit la MUF de référence pour un mode E. Pour toutes les longueurs de trajet, on effectue la même opération pour la MUF de référence pour le mode F2. Le cas échéant, la plus élevée de ces valeurs correspond à la MUF de référence pour le trajet.

2.2 *Prévision de foE*

Pour des trajets jusqu'à 2000 km, foE est évalué au point milieu du trajet. Pour des trajets supérieurs à 2000 km, foE est évalué en deux points de contrôle, respectivement à 1000 km de l'émetteur et du récepteur, le long du trajet.

On détermine la distance zénithale du Soleil χ, en degrés, en ces points. On a alors:

$$\text{foE} = 0{,}9 \left[(180 + 1{,}44\, R_{12}) \cos \chi'\right]^{0{,}25} \quad \text{MHz}$$

où:

$\chi' = \chi$ pour $0 \leqslant \chi \leqslant 80$

$\chi' = 90 - \dfrac{e^{0{,}13(116 - \chi)}}{10{,}8}$ pour $80 < \chi < 116$

et

$\chi' = 89{,}907$ pour $\chi \geqslant 116$

R_{12} : moyenne glissante du nombre de taches solaires sur 12 mois.

2.3 *Prévision de la MUF de référence pour la couche E* (E(*D*) MUF)

La valeur de foE au point milieu du trajet (pour des trajets d'une longueur maximale de 2000 km) ou la plus basse des valeurs de foE aux deux points de contrôle (pour des trajets d'une longueur supérieure à 2000 km) est utilisée pour le calcul de la MUF de référence pour la couche E.

La MUF pour un trajet de longueur D est donnée par:

$$E(D)\ \text{MUF} = \text{foE sec } i_{110}$$

où:

i_{110} = angle d'incidence à une altitude de 110 km, évalué comme indiqué dans le Rapport 252.

2.4 *Fréquence d'occultation par la couche E (f_s)*

La valeur de foE au point milieu du trajet (pour des trajets d'une longueur maximale de 2000 km) ou la plus élevée des valeurs de foE aux deux points de contrôle situés à 1000 km de chaque extrémité du trajet (pour des trajets d'une longueur supérieure à 2000 km) est utilisée pour le calcul de la fréquence d'occultation par la couche E.

$$f_s = 1{,}05\ \text{foE sec } \varphi_s$$

où:

$$\varphi_s = \arcsin\left[\frac{R\cos\Delta_F}{R+110}\right]$$

R: rayon de la Terre (6371 km)

Δ_F: angle de rayonnement vertical pour le mode F2 (voir le § 3).

2.5 *Données relatives à la couche F2*

Des cartes numériques des paramètres foF2 et M(3000)F2 pour des valeurs d'indice solaire $R_{12} = 0$ et 100 et pour chaque mois sont présentées dans le Rapport 340. Dans cette méthode de prévision, on utilise les coefficients d'Oslo pour déterminer les valeurs de foF2 et de M(3000)F2 pour les emplacements et les temps voulus. Selon les détails de l'application, il peut être souhaitable de calculer à l'avance les valeurs de ces paramètres sur une grille cartographique, à certains intervalles de latitude, de longitude et de temps; on applique ensuite une interpolation pour obtenir les valeurs pour les emplacements et les temps recherchés, entre des points appropriés de la grille.

2.6 *Prévision de la MUF de référence pour F2* (F2(D)MUF)

2.6.1 *Pour des trajets jusqu'à 4000 km*

On calcule la MUF de référence pour F2 d'après:

$$\text{F2(ZÉRO)MUF} = \text{foF2} + f_H/2$$
$$\text{F2(4000)MUF} = 1{,}1\ \text{foF2} \cdot \text{M(3000)F2}$$

où f_H est la gyrofréquence des électrons, exprimée en fonction des paramètres du champ magnétique terrestre. Une représentation numérique est donnée dans le Rapport 340.

Au point milieu du trajet orthodromique entre l'émetteur et le récepteur, on détermine les valeurs ci-dessus pour les valeurs de l'indice d'activité solaire $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$. On fait une interpolation ou une extrapolation linéaire pour les valeurs d'indice requises entre $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 150$. Pour une activité solaire plus élevée, on utilise $R_{12} = 150$. Les mêmes paramètres peuvent être obtenus d'après les cartes graphiques du Rapport 340.

On interpole pour la longueur du trajet au moyen de la relation:

$$\text{F2}(D)\text{MUF} = \text{F2(ZÉRO)MUF} + [\text{F2(4000)MUF} - \text{F2(ZÉRO)MUF}] \times \text{M}(D)$$

où:

$$\text{M}(D) = 1{,}64 \times 10^{-7} D^2 \qquad \text{pour } 0 \leqslant D < 800 \text{ et}$$
$$\text{M}(D) = 1{,}26 \times 10^{-14} D^4 - 1{,}3 \times 10^{-10} D^3 + 4{,}1 \times 10^{-7} D^2 - 1{,}2 \times 10^{-4} D \qquad \text{pour } 800 \leqslant D \leqslant 4000$$

D étant exprimé en km.

On obtient ainsi la valeur médiane de la MUF de référence pour la couche F2.

2.6.2 *Pour des trajets de longueur supérieure à 4000 km*

Pour ces trajets (qui peuvent être l'arc de grand cercle le plus long), les points directeurs se trouvent à 2000 km de chaque extrémité du trajet. On détermine en ces points les valeurs de F2(4000)MUF en interpolant pour la valeur de l'activité solaire et on choisit la valeur la plus petite. On obtient ainsi la valeur médiane de la MUF de référence pour la couche F2.

2.7 *MUF d'exploitation*

Pour les modes F2, le Tableau I donne le facteur *Rop* (rapport de la MUF d'exploitation à la MUF de référence).

Ainsi (valeur médiane de la MUF d'exploitation) = (valeur médiane de la MUF de référence) × *Rop.*

Pour les modes de la couche E et aux fins de planification, on peut admettre que la MUF d'exploitation est égale à la MUF de référence.

On peut faire une estimation de la MUF d'exploitation dépassée pendant 10% et 90% des jours en multipliant la valeur médiane de la MUF d'exploitation respectivement par les facteurs 1,15 et 0,85.

TABLEAU I – *Rapports de la MUF d'exploitation à la MUF de référence, Rop*

p.i.r.e. (dBW)	Eté		Equinoxe		Hiver	
	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour
⩽ 30	1,20	1,10	1,25	1,15	1,30	1,20
> 30	1,25	1,15	1,30	1,20	1,35	1,25

3. Angle de rayonnement vertical

On tient compte de l'angle de rayonnement dans la prévision du champ. Cet angle est donné, en première approximation, par la formule:

$$\Delta = \text{arc tg}\left(\text{cotg}\,\frac{d}{2R} - \frac{R}{R+h'}\,\text{cosec}\,\frac{d}{2R}\right)$$

dans laquelle:

d: longueur du bond pour un mode à n bonds, donnée par: $d = D/n$

h' : 110 km pour la couche E, ou la valeur indiquée au § 4.1 pour la couche F2.

Des angles déterminés ainsi s'appliquent à des fréquences inférieures, à la MUF de référence, mais voisines de celle-ci. Toutefois, on admet qu'ils s'appliquent à toutes les fréquences, y compris aux fréquences supérieures à la MUF de référence.

4. Prévision du champ médian

4.1 *Méthode pour des longueurs de trajet de 0 à 7000 km*

Cette méthode est essentiellement basée sur celle que propose le Rapport 252, certains paramètres étant révisés sur la base du Supplément au Rapport 252 et d'informations plus récentes. La médiane se rapporte à un échantillon de tous les jours et pas seulement aux jours où la fréquence d'émission est inférieure à la MUF d'exploitation.

Le Rapport 252 précise les conditions géométriques, les zones de réflexion utilisées et la méthode applicable pour calculer le trajet du rayon.

Les modes d'ordre inférieur sont pris en considération pour la couche E et pour la couche F2:

- pour des trajets inférieurs à 2000 km, on fait les prévisions pour les modes 1E, 1F2 et 2F2;
- pour des trajets compris entre 2000 et 4000 km, on fait les prévisions pour les modes 2E, 1F2 et 2F2;
- pour des trajets compris entre 4000 et 7000 km, on fait les prévisions pour les modes 2F2 et 3F2;
- pour des trajets compris entre 7000 et 9000 km, on fait les prévisions pour le mode 3F2.

Si le mode d'ordre le plus bas n'est pas possible pour un angle de départ minimal spécifié, le mode immédiatement supérieur est considéré.

Lorsqu'un mode F2 de rang inférieur est occulté par la couche E (comme déterminé dans les calculs du trajet du rayon), ou lorsque l'on spécifie une antenne ne rayonnant suffisamment que sous des angles élevés, il faut considérer le mode d'ordre immédiatement supérieur.

Une première estimation du nombre de bonds pour un trajet quelconque est donnée en utilisant une hauteur virtuelle calculée par la formule de Shimazaki:

$$h_pF2 = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km}$$

Ensuite, la hauteur de réflexion équivalente h' (fonction du temps, de l'emplacement et de la longueur du trajet) est utilisée pour calculer le trajet du rayon pour les modes F2 de tous ordres:

$$h' = 358 - (11 - 100a)\left(18{,}8 - \frac{320}{x^5}\right) + ad\left(0{,}03 + \frac{14}{x^4}\right) \quad \text{km}$$

ou 500 km, en prenant la valeur la plus petite

a = 0,04 ou (1/M(3000)F2) − 0,24 en prenant la valeur la plus grande

x = foF2/foE ou 2, en prenant la valeur la plus grande.

Les valeurs h' sont déterminées à tous les points de réflexion et on prend la valeur moyenne.

Le champ médian pour un mode est donné par la formule:

$$E_{ts} = 136{,}6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_{bf} - L_i - L_c - L_m - L_g - L_h - L_z \quad \text{dB}(1\ \mu\text{V/m})$$

où:

f: fréquence d'émission (MHz)

P_t: puissance de l'émetteur (dB(1 kW))

G_t: gain de l'antenne d'émission aux angles d'azimut et de site requis par rapport à une antenne isotrope

L_{bf}: l'affaiblissement en espace libre en dB, donné par:

$$L_{bf} = 32{,}45 + 20 \log f + 20 \log p'$$

p' : distance oblique virtuelle (km):

$$p' = \left[2R \sum_n \frac{\sin \frac{d}{2R}}{\cos\left(\Delta + \frac{d}{2R}\right)}\right]$$

L_i: affaiblissement par absorption (dB) indiqué dans le Rapport 252. Il est déterminé pour chaque bond et les résultats sont additionnés. Pour les fréquences supérieures à la MUF de référence, il continue de varier avec la fréquence et est calculé en considérant des trajets de rayon similaires à ceux de la MUF.

L_c: terme de correction de l'affaiblissement par absorption pour les modes E qui ne pénètrent pas dans toute la couche absorbante.

– Pour $f <$ EMUF:

$L_c = 1{,}359 + 8{,}617 \log_e (f/\text{EMUF})$ dB

si $L_c > 0$, prend la valeur de $L_c = 0$ dB

si $L_c < -9$, prend la valeur de $L_c = -9$ dB

– Pour $f \geqslant$ EMUF:

$L_c = 0$ dB

– Pour les modes F:

$L_c = 0$ dB

L_m: affaiblissement aux fréquences supérieures à la MUF (indiqué dans le Supplément au Rapport 252). Pour les fréquences, f, supérieures à la MUF de référence (f_g) d'un mode donné:

$$L_m = 130\left(\frac{f}{(f_g)} - 1\right)^2 \quad \text{dB}$$

L_m est indépendant du nombre de bonds, mais est limité à une valeur de 81 dB.

L_g : affaiblissement par réflexion sur le sol aux points de réflexion intermédiaires:

- pour des trajets à 1 bond, $L_g = 0$
- pour des trajets à 2 bonds, $L_g = 2$ dB
- pour des trajets à 3 bonds, $L_g = 4$ dB

L_h : facteur qui permet de tenir compte des affaiblissements auroraux et autres; il s'obtient en retranchant 9 dB des valeurs médianes de Y_p indiquées aux Tableaux II et III du Rapport 252-2.

L_z : terme contenant les effets de la propagation ionosphérique qui ne seraient pas inclus dans une méthode rapide et simple telle que celle-ci. La valeur actuelle recommandée est 7,3 dB (Recommandation 621).

4.2 *Méthode pour des longueurs de trajet supérieures à 9000 km*

Dans cette méthode, on effectue les prévisions en divisant le trajet en un nombre minimal, n, de bonds d'égale longueur, dont aucun ne dépasse 4000 km.

La valeur médiane du champ total est donnée par la formule:

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left(\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right) \right] - 36{,}4 + P_t + G_t - L_y \qquad \text{dB}(1\ \mu\text{V/m})$$

dans laquelle E_0 est le champ en espace libre pour une p.i.r.e. de 3 MW. Dans ce cas:

$E_0 = 139{,}6 - 20 \log p'$ et la hauteur utilisée dans la détermination de p' est 300 km.

L_y : terme analogue à L_z. La valeur actuelle recommandée est $-3{,}9$ dB (Recommandation 621).

f_M : fréquence limite supérieure. Elle est déterminée séparément pour le premier et pour le dernier bond du trajet et on prend la valeur la plus faible.

$$f_M = K \cdot f_g \qquad \text{MHz}$$

$$K = 1{,}2 + W \frac{f_g}{f_{g,\,\text{midi}}} + X \left(\sqrt[3]{\frac{f_{g,\,\text{midi}}}{f_g}} - 1 \right) + Y \left(\frac{f_{g,\,\text{min}}}{f_{g,\,\text{midi}}} \right)^2$$

f_g : MUF de référence pour la longueur du bond (F2(d)MUF),

$f_{g,\,\text{midi}}$: valeur de f_g à une heure correspondant au midi local au point de contrôle.

$f_{g,\,\text{min}}$: valeur la plus faible de f_g pour le bond sur une durée de 24 h.

Les valeurs de W, X et Y sont données dans le Tableau II. L'azimut du trajet de grand cercle est déterminé au point milieu du trajet total et cet angle est utilisé pour l'interpolation linéaire des angles entre les valeurs est-ouest et nord-sud.

TABLEAU II – *Valeurs de W, X et Y utilisées pour déterminer le facteur de correction K*

	W	X	Y
Est-ouest	0,1	1,2	0,6
Nord-sud	0,2	0,2	0,4

f_L : est la fréquence limite inférieure pour un trajet diurne:

$$f_L = \left(5{,}3 \times I \left[\frac{(1 + 0{,}009\ R_{12}) \sum_{2n} \cos^{1/2} \chi}{\cos i_{90} \log_e \left(\frac{9{,}5 \times 10^6}{p'} \right)} \right]^{1/2} - f_H \right) \cdot A_W \qquad \text{MHz}$$

Dans la formule, la valeur de χ est calculée pour chaque passage du trajet du rayon à l'altitude 90 km.

Lorsque $\chi > 90°$, $\cos^{1/2} \chi$ est pris égal à zéro.

i_{90} : angle d'incidence à l'altitude de 90 km.

I est donné dans le Tableau III.

A_w : facteur d'anomalie d'hiver déterminé au point milieu du trajet; il est égal à 1 pour des latitudes géographiques de 0 à 30° et de 90° et atteint les valeurs maximales données au Tableau IV à 60°. Les valeurs aux latitudes intermédiaires s'obtiennent par interpolation linéaire.

A mesure que le trajet devient «nocturne», les valeurs de f_L sont calculées jusqu'à l'instant t_n où $f_L \leqslant 2\, f_{LN}$ avec $f_{LN} = \sqrt{\dfrac{D}{3000}}$ (MHz). Pendant les trois heures suivantes, f_L est calculé à partir de la formule $f_L = 2\, f_{LN} e^{-0{,}23t}$ où t est le nombre d'heures après l'instant t_n. Pour le reste de la nuit, $f_L = f_{LN}$ jusqu'au moment où l'équation pour la période diurne donne une valeur plus élevée.

TABLEAU III – *Valeurs de I utilisées dans l'expression de f_L*

Latitudes		Mois											
Extrémité 1	Extrémité 2	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
> 35° N	> 35° N	1,1	1,05	1	1	1	1	1	1	1	1	1,05	1,1
> 35° N	35° N - 35° S	1,05	1,02	1	1	1	1	1	1	1	1	1,02	1,05
> 35° N	> 35° S	1,05	1,02	1	1	1,02	1,05	1,05	1,02	1	1	1,02	1,05
35° N - 35° S	35° N - 35° S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35° N - 35° S	> 35° S	1	1	1	1	1,02	1,05	1,05	1,02	1	1	1	1
> 35° S	> 35° S	1	1	1	1	1,05	1,1	1,1	1,05	1	1	1	1

TABLEAU IV – *Valeurs du facteur d'anomalie d'hiver A_w, à la latitude géographique de 60° utilisée dans l'expression de f_L*

Hémisphère	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nord	1,30	1,15	1,03	1	1	1	1	1	1	1,03	1,15	1,30
Sud	1	1	1	1,03	1,15	1,30	1,30	1,15	1,03	1	1	1

4.3 *Méthode pour les longueurs de trajet comprises entre 7000 et 9000 km*

Dans cet intervalle de distances, les champs E_{ts} et E_{tl} sont déterminés à l'aide des deux méthodes décrites plus haut; le résultat, en décibels, s'obtient par interpolation, comme suit:

$$E_{ti} = E_{ts} + \frac{D - 7000}{2000} (E_{tl} - E_{ts}) \qquad \text{dB}(1\mu\text{V/m})$$

RAPPORT 253-4

MESURE DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1963-1966-1974-1978-1982)

1. Introduction

La mesure du champ de l'onde ionosphérique, si elle est effectuée dans des conditions soigneusement respectées, est précieuse lorsqu'il s'agit de déterminer la précision des méthodes d'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission. Elle peut également fournir une indication des sources d'erreur dont risquent d'être entachées les méthodes de prévision existantes et peut donc, ou contribuer à améliorer ces méthodes, ou servir de base pour l'élaboration de nouvelles méthodes. La Recommandation 378 précise que, à condition de mettre en œuvre des méthodes appropriées, on doit pouvoir atteindre une précision de mesure de ± 2 dB. Si l'on admet que les puissances rayonnées peuvent être déterminées avec cette même précision, il en résulte que tout écart de plus de 4 dB entre un résultat de mesure et la valeur prévue a un caractère significatif. Théoriquement, on doit systématiquement faire des mesures dans le plus grand nombre de conditions possibles, sur une série de fréquences et sur des trajets de diverses longueurs dans toutes les parties du monde. On a également besoin des résultats de mesure pour chaque heure du jour, pour chacune des saisons et pour différentes phases du cycle solaire.

Depuis 1962, le Secrétariat du CCIR, en collaboration avec le Groupe de travail intérimaire 6/1, tient à jour une «Banque de données» d'après les résultats que lui fournissent certaines administrations et certaines organisations. Les données existantes se sont déjà révélées utiles, mais elles sont relativement peu nombreuses et il est évident qu'il faut en augmenter le nombre. Il est certes reconnu que les occasions de faire des mesures sur des circuits particuliers ne se présentent souvent que de façon fortuite, du fait que les horaires d'émission et les caractéristiques des systèmes, comme par exemple le choix des antennes, sont imposés par des questions d'exploitation; ces mesures peuvent néanmoins fournir des résultats utiles. Il est cependant évident que les données présentent le maximum d'intérêt lorsque les mesures sont effectuées dans des conditions normalisées et que leurs résultats sont analysés et mis sous forme de tableaux selon des procédures uniformes. Le présent Rapport expose les critères qu'il est souhaitable de respecter dans la mesure où d'autres contraintes le permettent. On trouvera dans les Rapports 227 et 273 des renseignements se rattachant également à ces questions.

Il existe des données complémentaires aux résultats des mesures du champ; ce sont les renseignements fournis par les mesures d'absorption ionosphérique. Toutes sortes de techniques permettent de déterminer cette absorption, notamment l'enregistrement de l'amplitude d'échos d'impulsions émises et reçues à la verticale et celui d'ondes entretenues reçues sous incidence oblique après propagation sur des trajets de diverses longueurs. Le présent Rapport ne traite pas des mesures d'absorption, lesquelles sont coordonnées par l'URSI. Les méthodes à suivre pour faire des mesures d'absorption sont exposées par Mitra [1970] et par Rawer et autres [1976]. Les données d'absorption pour les périodes 1957-1959 (Année géophysique internationale/Coopération géophysique internationale) et 1964-1965 (Année internationale du Soleil calme) ont été publiées par Shapley et autres [1974]; d'autres données concernant l'absorption peuvent être fournies par les Centres mondiaux de données.

2. Choix des circuits et des périodes d'exploitation

On a besoin de rassembler des données relatives au champ, qui se rapportent à des circuits de diverses longueurs situés dans toutes les régions du globe. Dans la pratique, une organisation désireuse de procéder à des enregistrements sur certains circuits choisira ceux-ci en se fondant sur les facteurs suivants:

- intérêt que les résultats attendus pourront présenter pour les systèmes de radiocommunication ou autres, mettant en jeu la propagation ionosphérique, qu'exploitent cette organisation ou ses collaborateurs: ces résultats sont susceptibles de fournir des renseignements utiles pour évaluer et, s'il le faut, améliorer la qualité des systèmes associés, ou de constituer de précieuses indications générales sur les conditions de propagation;
- possibilité de disposer d'émetteurs appropriés, ou encore d'emplacements où installer ces émetteurs.

De manière générale, les phénomènes de propagation sont plus faciles à interpréter lorsque les liaisons sont courtes (distance au sol entre extrémités inférieure à 2500 km), aussi est-ce probablement dans ce domaine que l'on a le plus de chance de pouvoir tirer d'utiles conclusions des résultats obtenus; d'ailleurs, les liaisons en ondes décamétriques, entre points fixes, étant en grand nombre remplacées par des liaisons par satellite ou par câble, une grande partie de celles qui subsistent sont des liaisons courtes. Les données synoptiques portant sur les trajets courts présentent en outre un certain intérêt scientifique pour l'étude des caractéristiques de propagation particulières à certaines régions géographiques (par exemple, pour l'étude de l'anomalie d'hiver de l'absorption). C'est en général aux latitudes moyennes que les conditions de propagation sont les plus stables et les plus régulières, alors qu'aux latitudes élevées et sur les circuits transéquatoriaux, la variabilité d'un jour à l'autre est grande, ce qui n'est pas pour faciliter l'interprétation des données. Pour les liaisons de longueur moyenne (de 2500

à 8000 km de portée), les signaux peuvent se propager en plusieurs bonds, ce qui implique des réflexions en plusieurs points de l'ionosphère, et le mode de propagation dominant ne reste pas le même; l'analyse des résultats obtenus s'en trouve compliquée. Pour les liaisons de grande longueur (au-delà de 8000 km), la propagation s'effectue souvent en dehors du grand cercle et elle a tendance à présenter, en différentes occasions, des variations de grande ampleur, tant systématiques que d'un jour à l'autre. Lorsque l'émetteur et le récepteur sont éloignés de plus de 15 000 km, à certaines heures de la journée, et selon les antennes employées, les signaux les plus intenses peuvent être ceux qui se sont propagés par l'arc de grand cercle le plus long.

Il convient de faire des enregistrements continus pendant le plus grand nombre d'heures possible chaque jour. On n'a pas souvent la possibilité pratique de se lancer dans une campagne de mesures qui s'étende sur une portion appréciable du cycle solaire; cependant, pour faciliter l'interprétation des résultats et pour que ceux-ci soient statistiquement significatifs, il faut que les mesures portent sur une durée d'au moins un an sur une fréquence fixe donnée. Il y a des avantages particuliers à essayer d'enregistrer les signaux simultanément sur une série de fréquences différentes pour un même trajet, à la fois pour faciliter la compréhension des effets de propagation et pour permettre d'obtenir des données quantitatives, la nuit, lorsque les MUF sont basses, aussi bien que le jour, lorsque les fréquences inférieures subissent une forte absorption, de sorte que les signaux sont masqués par le bruit de fond.

3. L'émetteur et l'antenne d'émission

L'émission dont on mesurera le champ peut provenir d'un émetteur déjà en service ou d'un émetteur spécialement destiné aux mesures à effectuer. Quoi qu'il en soit, on doit pouvoir l'identifier sans ambiguïté, afin d'être sûr d'enregistrer l'émission désirée, et non un signal transmis dans la même voie ou dans une voie adjacente, ou un bruit parasite. Il est souhaitable que les signaux soient interrompus périodiquement, par exemple 5 min par heure, à la fois pour faciliter l'identification de l'émetteur et pour déterminer les niveaux de bruit de fond reçus en vue de confirmer l'absence de contamination notable du signal. L'émetteur devrait fonctionner de préférence 24 h par jour. La stabilité de sa fréquence et de la puissance qu'il rayonne sont des conditions fondamentales, et ces deux caractéristiques doivent être connues avec précision. Pour la réception sur des liaisons de courte longueur, la puissance rayonnée devrait être d'au moins 1 kW; pour les distances moyennes ou longues, elle devrait être d'au moins 10 kW. Si l'émetteur utilisé est un émetteur spécial, il fonctionnera normalement en ondes entretenues, mais pourra aussi être utilisé en régime d'impulsions afin de pouvoir étudier les caractéristiques des divers modes de propagation. Si l'émetteur utilisé est un poste du commerce émettant des signaux modulés, il importe que le type de modulation reste le même et que la valeur moyenne du taux de modulation ne varie pas. Les émissions à bande étroite (au maximum 1 kHz environ) se prêtent le mieux à l'enregistrement; il en va de même d'une composante à bande étroite d'un signal composite. Les signaux à bande plus large risquent d'être contaminés par un brouilleur. Les émissions de fréquences étalon ont été employées autrefois, mais, dans de nombreux sites de réception, il y a aujourd'hui de sérieux brouillages dus aux divers émetteurs qui émettent sur la même fréquence. On peut néanmoins éviter ces brouillages dans une certaine mesure en utilisant un récepteur à bande étroite capable de séparer les diverses audiofréquences de modulation de chacun des émetteurs travaillant dans la même voie. Les émetteurs des services radiotéléphoniques ou radiotélégraphiques entre points fixes présentent deux avantages: ils fonctionnent dans des canaux relativement exempts de brouillages et l'on connaît généralement leurs vacations de manière détaillée; en revanche, ils emploient souvent des antennes à gain élevé, ce qui est plutôt un inconvénient.

Un examen de la Liste internationale des fréquences que tient à jour l'IFRB peut rendre de grands services lorsqu'il s'agit de choisir des émetteurs adéquats; dans la plupart des cas, elle donne des renseignements sur la puissance rayonnée, sur le type de modulation et sur l'horaire d'exploitation, parfois sur l'antenne et sur son orientation. La Liste internationale des fréquences est également utile en ce qu'elle indique les émetteurs, fonctionnant dans la même voie ou dans une voie adjacente, dont il faut tenir compte pour évaluer les probabilités de brouillage. Cependant, avant de se lancer dans un programme de mesures systématiques dès que l'on a découvert, comme il vient d'être dit, un émetteur qui s'y prête probablement, il est recommandé de commencer par faire une série de mesures de contrôle à différentes heures pendant environ un mois, afin de déterminer l'ordre de grandeur des champs que l'on rencontrera, les périodes de la journée pendant lesquelles le signal peut être reçu ainsi que les niveaux de brouillage. Ensuite, on se mettra en relation avec l'organisme qui exploite l'émetteur dont il s'agit afin de vérifier les inscriptions de la Liste internationale des fréquences et de se procurer les renseignements supplémentaires dont on peut avoir besoin (par exemple: type d'antenne, propriétés du sol, etc.). A cette occasion, on devra vérifier que la puissance rayonnée est bien maintenue constante, que c'est bien la même antenne qui est utilisée le jour et la nuit, enfin que l'émetteur ne fait pas partie d'un réseau d'émetteurs fonctionnant sur la même fréquence à partir d'emplacements géographiques différents – ce qui est un mode d'exploitation utilisé par certains pays pour le service de radiodiffusion en ondes décamétriques. Il importe encore de se faire confirmer que l'émetteur restera bien en service pendant toute la période durant laquelle on a l'intention de faire des mesures. Ce n'est qu'ensuite que l'on pourra prendre la décision de procéder à l'enregistrement systématique des émissions. Il serait souhaitable d'être informé en détail sur les incidents de fonctionnement de l'émetteur et notamment d'avoir connaissance de tout défaut ou de toute modification temporaire d'une caractéristique technique susceptible d'avoir des répercussions sur les mesures de champ; mais il est rare que l'on puisse se procurer ces renseignements et que l'on puisse grâce à eux appliquer a posteriori des corrections aux résultats. Aussi convient-il dès le début d'éviter de choisir des émetteurs connus pour les fluctuations de leurs caractéristiques.

Pour qu'un émetteur se prête à des mesures de champ, il faut que les caractéristiques de son antenne soient connues avec précision. Les émetteurs associés à des antennes peu directives présentent des avantages sur ceux dont les antennes sont très directives: le diagramme de rayonnement réel est alors généralement plus voisin du diagramme de rayonnement théorique; les champs créés, au lieu de réception, par des ondes propagées selon des modes différents sont déterminés principalement par les effets de la propagation; on peut enfin aboutir à des conclusions valables moyennant une hypothèse unique sur le gain de l'antenne d'émission faute d'une connaissance des directions d'émission des ondes. Malheureusement, on utilise rarement des antennes à faible gain pour les applications courantes: la plupart des liaisons à ondes décamétriques entre points terrestres fixes se font avec des antennes en losange ou log-périodiques à gain élevé; en radiodiffusion par onde ionosphérique, on trouve généralement des réseaux de doublets horizontaux, dont l'effet directif est lui aussi élevé. Il y a cependant une exception: celle des émetteurs de signaux horaires, dont le but est d'assurer une couverture tous azimuts au moyen de doublets demi-onde verticaux. De telles émissions conviennent particulièrement bien pour les enregistrements concernés. Le diagramme de directivité d'un doublet vertical peut être estimé de façon assez précise, sauf toutefois aux faibles angles de site, lorsque les constantes du sol ont sur le champ une influence prédominante. Cependant, même pour ces faibles angles de site, le comportement de l'antenne est connu de façon plus précise que pour la plupart des autres types d'antenne. Mais si aucun émetteur de ce genre n'est situé d'une manière telle qu'il se prête bien aux mesures, on devra, avant de contrôler les émissions provenant d'une antenne directive, vérifier que le trajet du grand cercle aboutissant au récepteur n'implique pas la réception de signaux provenant d'un lobe latéral. Si la mesure se fait après une propagation à moyenne ou à grande distance, l'idéal serait que le diagramme de directivité vertical de l'antenne pour des angles de site inférieurs à 20° se rapproche de celui d'une antenne verticale courte située au-dessus d'un sol moyen (voir la Fig. 1a).

Quand l'émetteur choisi pour les mesures est un émetteur spécial, on doit de préférence utiliser une antenne verticale courte. On peut encore, pour les faibles distances, utiliser un doublet horizontal orienté de manière que son rayonnement transversal se fasse dans la direction du grand cercle. Pour les plus grandes portées, qui correspondent à de faibles angles de sites, les deux composantes de l'onde ionosphérique (onde directe et onde réfléchie par le sol) s'annulent presque l'une l'autre; les antennes horizontales sont donc fort peu efficaces (à moins d'être installées à une grande hauteur) et il convient de les éviter.

Pour déterminer le gain d'une antenne d'émission – comme d'ailleurs celui d'une antenne de réception – le mieux est de procéder à des mesures du champ à son voisinage mais à une distance grande par rapport à la longueur d'onde. Toutefois, il faut reconnaître que ces mesures sont rarement incluses dans le programme normal de travail d'une installation d'émission et que l'on ne peut généralement pas les faire en un endroit éloigné autrement que sous le contrôle de l'organisme responsable de la réception. En conséquence, on doit d'ordinaire calculer le gain de l'antenne d'émission en se fondant sur des relations théoriques faisant intervenir ce que l'on sait de la géométrie de l'antenne et sur certaines hypothèses relatives à la nature du terrain.

4. L'antenne de réception, le récepteur et les techniques d'enregistrement

Les méthodes de prévision du champ actuellement en vigueur ne tiennent pas compte des déformations du champ provoquées par certaines particularités de l'emplacement de réception, telles que les ondulations du terrain et les obstacles que constituent les bâtiments, la végétation ou encore les antennes voisines qui se comportent comme des sources de rayonnement secondaire; il est donc important d'installer l'antenne de réception de manière que ces effets soient réduits au minimum. La pente du terrain, en-deçà d'une distance égale à cinq longueurs d'onde, ne doit pas dépasser 2° et il ne doit exister aucun obstacle qui, du centre de l'antenne, soit vu, dans le plan horizontal, sous un angle de plus de 5°. Aucune autre antenne ne doit se trouver à une distance inférieure à 10 fois la longueur de l'antenne de réception.

Pour l'antenne de réception, le plus important n'est pas qu'elle ait un gain élevé, mais que ses caractéristiques soient connues avec précision. Sauf sur les fréquences les plus basses et de jour, quand l'absorption ionosphérique est importante, les niveaux de seuil pour la détection du signal sont normalement déterminés par l'intensité des bruits extérieurs, quelle que soit l'antenne de réception. En règle générale, plus le gain d'une antenne est grand, plus on risque de faire des erreurs dans l'évaluation de ses caractéristiques. Aussi est-il recommandé d'utiliser, soit une antenne verticale unipolaire reliée à la terre et plus courte que le quart de la longueur d'onde (comme le recommande la Recommandation 378), soit un cadre de petites dimensions. Normalement, le plan du cadre devrait coïncider avec le plan vertical du grand cercle passant par l'émetteur. Pour les grandes portées, la propagation en dehors du grand cercle risque de jouer un rôle important, l'antenne verticale unipolaire est préférable en raison de son effet équidirectif dans le plan horizontal. Il y a des organisations qui mesurent les champs avec des antennes verticales unipolaires, puis qui normalisent les résultats au moyen de données d'étalonnage impliquant la comparaison d'échantillons de signaux sélectionnés avec les indications d'un «mesureur de champ» portatif comportant un cadre de réception incorporé (pour plus de détails, voir le Rapport 227).

La Fig. 1a représente la variation, en fonction de l'angle de site, du terme $E_0 - E$, (mesure du niveau du signal capté résultant d'une onde ionosphérique incidente d'intensité constante et de l'onde réfléchie au sol qui lui est associée, selon les définitions données plus loin au § 6.2) pour une antenne verticale unipolaire courte mise à la terre et pour un cadre, l'un et l'autre situés au-dessus d'un sol moyen. Pour des angles de site inférieurs à 30° environ, les deux diagrammes de directivité sont très voisins mais, pour des angles de site plus grands, le diagramme du cadre est plus avantageux car le niveau du signal capté dépend relativement peu de l'angle. La

Fig. 1b montre l'effet des constantes du sol au-dessus duquel l'antenne est située. Le niveau du champ reçu au-dessus d'un sol humide est supérieur de 2 à 6 dB à ce qu'il est au-dessus d'un sol très sec, la différence étant maximale aux faibles angles de site. L'influence sensible des constantes du sol ainsi que de l'angle de site lorsque celui-ci est faible, influence que nous avons déjà signalée à propos de l'antenne d'émission, rend particulièrement difficile l'interprétation des données pour les longs trajets associés à des angles de site imparfaitement connus. En principe, l'emploi d'un réseau de terre rendrait le fonctionnement du système de réception moins sensible aux conditions météorologiques qui affectent le degré d'humidité du sol. Ce réseau de terre améliorerait les constantes du sol et augmenterait le niveau du signal reçu mais, pour être efficace, il devrait avoir des dimensions de l'ordre de plusieurs dizaines de longueurs d'onde, ce que l'on peut rarement atteindre dans la pratique. En revanche, on peut poser des réseaux de terre plus petits, de dimensions au plus égales à cinq longueurs d'onde, qui contribuent à stabiliser l'impédance de l'antenne et par conséquent à améliorer ses conditions d'adaptation. Lorsqu'un réseau de terre a été installé, il est bon d'évaluer son effet en procédant à des mesures d'étalonnage sur des signaux émis par un émetteur aéroporté dans son voisinage mais à une distance grande par rapport à la longueur d'onde.

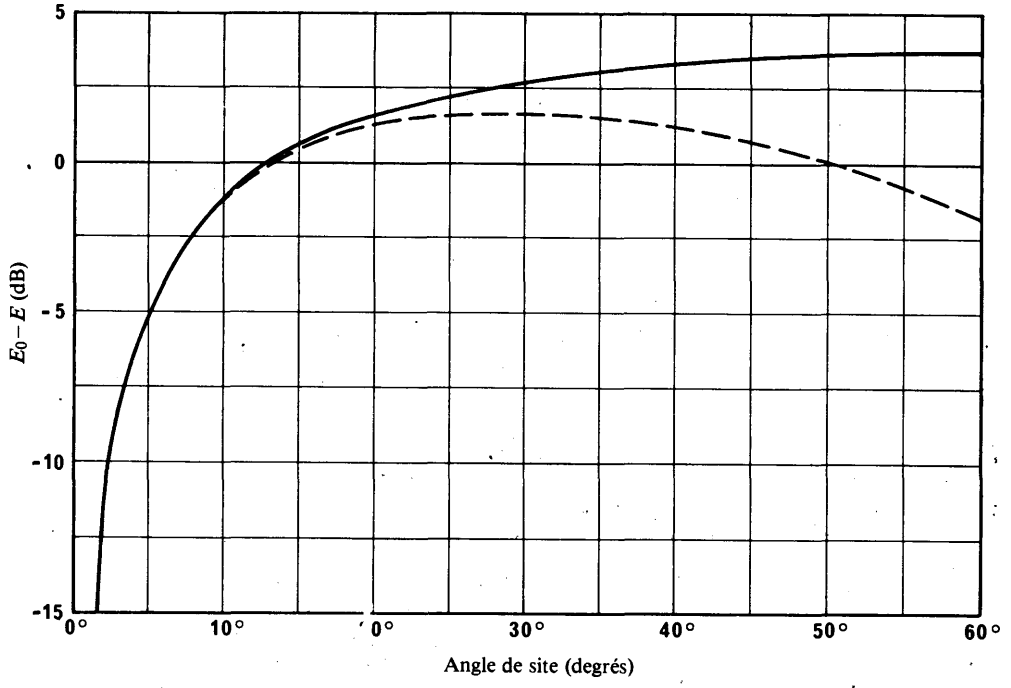
Pour la réception de signaux à courte distance, il est préférable d'employer des doublets horizontaux demi-onde en cas d'enregistrement sur une seule fréquence, ou bien des doublets avec impédance terminale en cas d'enregistrement sur plusieurs fréquences; le niveau du champ capté ne dépend pas alors beaucoup des constantes du sol. Cependant, aux distances moyennes et longues, quand les angles de site sont faibles, le niveau reçu par ces antennes est limité et il dépend de nouveau beaucoup de l'angle de site, à moins que les antennes ne soient placées à une grande hauteur. On ne devrait pas les utiliser sur de telles distances en raison des difficultés d'étalonnage.

Certaines organisations sont équipées pour faire des mesures à l'aide de systèmes d'antenne spéciaux, comme des rideaux de losange, conçus pour améliorer le rapport signal/bruit sur des circuits particuliers et permettre des mesures dans des conditions où une antenne unique serait inutilisable. Il est difficile d'interpréter les résultats obtenus avec un système d'antennes étendu, en présence d'un champ complexe constitué de plusieurs ondes arrivant sous des angles d'incidence différents, mais ces résultats peuvent néanmoins être acceptables pour le but poursuivi si l'on peut les rattacher de façon cohérente à ceux que fournirait en même temps une antenne de type normalisé. Avant de se décider pour une antenne sensible à la polarisation verticale ou horizontale, il est prudent de vérifier (voir par exemple [Bradley, 1968]) que, si les trajets de propagation font intervenir des ondes dont la polarisation est nettement non circulaire, la réception (ou l'émission) porte essentiellement sur l'onde ordinaire la plus intense.

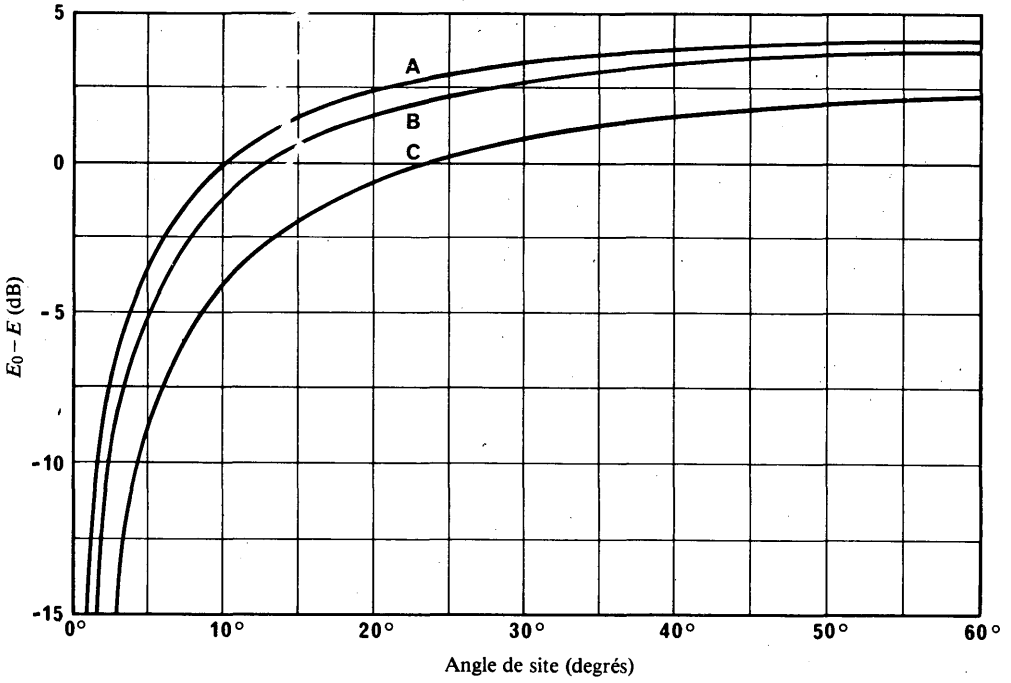
La liaison entre l'antenne de réception et le récepteur doit se faire par un câble coaxial enterré avec circuit d'adaptation approprié: transformateur ou préamplificateur à large bande. La bande passante du récepteur devrait être aussi étroite que le permet la largeur de bande des signaux à recevoir, cela afin que le rapport signal/bruit soit le meilleur possible. Pour la réception d'ondes entretenues et pour le contrôle des signaux audibles permanents transmis sur les bandes latérales des émissions de signaux horaires, on suggère que la bande passante soit de l'ordre de 100 Hz au maximum [Wakai et autres, 1971].

Le niveau du signal reçu dépend de la puissance rayonnée à l'intérieur de la bande passante du récepteur. Les facteurs déterminants sont: la porteuse, la modulation et le mode d'enregistrement. Si la bande passante du récepteur englobe la porteuse et toutes les bandes latérales, la puissance rayonnée agissante est égale à la somme de celle de la porteuse et de toutes les autres composantes. La Recommandation 326 donne des valeurs numériques pour divers types de modulation. Dans le cas de la réception à bande étroite d'une bande latérale unique d'une émission de signaux horaires dont la puissance de l'onde porteuse est P et le taux de modulation m, la puissance dans une bande latérale est égale à $m^2P/4$.

Les signaux reçus doivent être détectés, appliqués au circuit approprié d'intégration et de lissage puis enregistrés. Ce que l'on recherche, c'est d'obtenir des résultats pour chaque heure de la journée de manière à pouvoir en déduire des valeurs médianes mensuelles et des paramètres de dispersion d'un jour à l'autre, tels que le quartile supérieur et le quartile inférieur. Certaines organisations contrôlent les émissions reçues sur des trajets obliques afin de pouvoir noter l'occurrence d'événements comme les PIDB et les orages magnétiques ou d'étudier statistiquement les évanouissements. En pareil cas, on peut être obligé de recourir à des méthodes d'enregistrements spéciales. Mais lorsque l'on cherche avant tout à rassembler des données horaires représentatives des variations du champ, le mieux est d'employer un enregistreur à stylet avec échelle d'amplitude logarithmique (c'est-à-dire graduée linéairement en décibels), la vitesse de déroulement du diagramme étant d'environ 2 cm par heure. La constante de temps d'intégration devrait être de l'ordre de 20 s. On obtient de la sorte une longueur d'enregistrement qui convient aux opérations de lissage effectuées à la main et l'on est à même d'écarter les sections visiblement contaminées par des brouillages ou de forts atmosphériques. Il est souvent plus simple d'enregistrer la tension de CAG d'un récepteur du commerce après l'avoir modifié de manière à porter à 20 s les constantes de temps de montée et de descente. Cette manière de procéder peut cependant conduire, dans certaines conditions, à des erreurs inacceptables, même après étalonnage de la courbe de réponse en ondes entretenues. La tension de sortie est d'ordinaire approximativement proportionnelle au logarithme de la tension d'entrée mais, puisque cette non-linéarité est associée au processus de détection et qu'elle se produit avant l'intégration, les enregistrements donnent le logarithme moyen du champ, et non pas sa moyenne en unités logarithmiques, qui est ce que l'on désire. Ces grandeurs diffèrent lorsqu'il y a évanouissement. Un autre mode d'enregistrement acceptable met en œuvre la quantification numérique des amplitudes instantanées, avec un taux d'échantillonnage convenable, de manière que soit couverte la périodicité connue des composantes typiques de l'évanouissement (avec des périodes d'évanouissement de l'ordre de 20 min). Un traitement par ordinateur permet alors de déterminer des valeurs représentatives. On ne saurait toutefois trop insister sur le fait qu'avec cette méthode, il faut exercer un contrôle régulier qui permette de s'assurer que ce que l'on mesure est bien l'émission utile.



a) Sol moyen, de conductivité σ = 0,01 S/m et de constante diélectrique relative ε = 15



b) Située sur sol humide, sur sol moyen et sur sol très sec

FIGURE 1 – *Différence entre E_0 (valeur efficace du champ équivalent) et E (valeur efficace du champ ionosphérique) pour une antenne unipolaire verticale courte et pour un cadre à une hauteur de 1 m. Fréquence 15 MHz*

Courbes A: sol humide σ = 0,02 S/m, ε = 20
B: sol moyen σ = 0,01 S/m, ε = 15
C: sol très sec σ = 0,002 S/m, ε = 5

— — — — antenne unipolaire

———— cadre

La meilleure représentation des valeurs horaires journalière est la médiane. Le mieux est de la calculer directement comme étant l'amplitude qui est dépassée pendant la moitié de la durée d'enregistrement, c'est-à-dire, pour le cas de la médiane horaire,, pendant 30 minutes. Cette façon de procéder est indépendante de l'échelle d'amplitude du diagramme. Lorsque l'enregistrement se fait avec une échelle d'amplitude logarithmique précise, la médiane peut encore s'obtenir approximativement en prenant sur le diagramme les 2/3 de l'écart entre le quasi-minimum et le quasi-maximum (le quasi-minimum étant la valeur dépassée pendant Q% du temps, avec $Q \geqslant 90$%, et le quasi-maximum étant la valeur dépassée pendant (100 – Q)% du temps), cela dans l'hypothèse où les évanouissements suivent la loi de distribution de Rayleigh (voir le Rapport 266).

5. Mesures d'étalonnage

Il y a lieu d'établir la relation entre la déviation de l'enregistreur et la tension injectée directement dans le récepteur par un générateur. On devra faire des mesures d'étalonnage périodiques afin d'exprimer la lecture de la tension (valeur quadratique moyenne) de ce générateur en fonction de l'amplitude correspondante du champ de l'onde ionosphérique enregistrée. Deux solutions sont possibles. Dans l'une, on doit mesurer l'affaiblissement du câble, l'affaiblissement d'adaptation et l'affaiblissement de couplage ainsi que l'impédance de l'antenne afin de pouvoir exprimer les données enregistrées en puissance disponible au récepteur et en intensité de champ associée. Dans l'autre, qui ne convient que pour la réception de composantes à polarisation verticale, on procède à une comparaison directe avec les valeurs indiquées par un «mesureur de champ» portatif comportant un cadre vertical. Dans ce cas, il importe que l'on soit certain des hypothèses que l'on a faites pour étalonner le mesureur de champ et que l'on sache bien quels sont les champs qui sont exprimés (voir le § 6.2 ci-dessous).

6. Passage des résultats de mesure à la puissance moyenne disponible au récepteur et à la valeur quadratique moyenne du champ de l'onde ionosphérique

Les méthodes d'estimation du champ de l'onde ionosphérique décrites dans le Rapport 252 et son supplément donnent les valeurs de la puissance moyenne disponible au récepteur en l'absence d'affaiblissements dans le système de réception ainsi que la valeur quadratique moyenne du champ de l'onde ionosphérique. Il faut donc établir des relations entre ces grandeurs et les tensions mesurées aux bornes d'entrée du récepteur.

6.1 *Puissance moyenne disponible au récepteur*

La relation entre la tension mesurée à l'entrée du récepteur lorsque celui-ci est alimenté par une antenne réelle et la puissance disponible d'une antenne de réception théoriquement sans pertes couplée à une charge adaptée dépend des affaiblissements du système de réception ainsi que des impédances de l'antenne et du récepteur. En règle générale, les affaiblissements du système de réception et l'impédance de l'antenne dépendent de la fréquence. Il est à noter que la relation dont il est question ici ne fait pas intervenir les directions d'arrivée des ondes ni leurs polarisations.

Considérons en premier lieu le cas théorique d'une antenne de réception sans pertes alimentant une charge adaptée.

Soit:

P_a : la puissance disponible à l'antenne de réception (en dBW),

V_0 : la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge adaptée (en dB(1 μV)),

r : la résistance de charge de l'antenne (en ohms).

On a:

$$P_a = V_0 - 10 \log r - 120$$

En particulier, si $r = 50$ ohms:

$$P_a = V_0 - 137 \qquad \text{(dB)} \qquad (1)$$

Considérons maintenant le cas pratique d'une antenne couplée à un récepteur par un câble d'alimentation et par un transformateur (ou tout autre circuit d'adaptation), mais où il y a certains affaiblissements d'adaptation. r est alors la résistance de charge présentée par le récepteur.

Soit:

V : la valeur efficace de la tension aux bornes d'entrée du récepteur (en dB(1 μV)),

L : l'affaiblissement du câble (en dB),

T : l'affaiblissement d'adaptation et de couplage (en dB).

L'évaluation de T suppose en général que l'on connaisse l'impédance de l'antenne. T comprend les pertes dans les transformateurs et autres circuits d'adaptation de l'antenne ainsi que les pertes relatives à l'adaptation du câble d'alimentation au récepteur. On a alors:

$$V_0 = V + L + T$$

de sorte que la formule (1) devient:

$$P_a = V + L + T - 137 \qquad \text{(dB)} \tag{2}$$

Pour la réception d'ondes ionosphériques sujettes à évanouissement, P_a représentant la puissance moyenne disponible (en dBW) et V la médiane horaire de la tension à l'entrée du récepteur (en dB(1 μV)), on doit inclure dans la formule (2) une certaine marge contre les évanouissements. Si l'on admet que l'évanouissement est de type Rayleigh, la valeur efficace de la tension est supérieure de 1,6 dB à sa médiane, de sorte que l'on a:

$$P_a = V + L + T - 135{,}4 \qquad \text{(dB)} \tag{3}$$

Cette dernière relation permet de rapporter les valeurs mesurées de V à la puissance P_a à condition de connaître les divers affaiblissements du système. Si l'on ne peut pas déterminer L et T, comme c'est par exemple le cas lorsque l'étalonnage se fait par normalisation au moyen d'un mesureur de champ portatif, on choisira alors de déterminer P_a en fonction de E, valeur efficace du champ de l'onde ionosphérique (en dB(μV/m)), dans le cas où cette grandeur est connue (voir le § 6.2). La formule est alors:

$$\begin{aligned} P_a &= E + G_r - 120 + 10 \log \left(\frac{\lambda^2}{480\,\pi^2} \right) \\ &= E + G_r - 20 \log f - 107{,}2 \qquad \text{dB} \end{aligned} \tag{4}$$

λ étant la longueur d'ondes (en m) et f la fréquence (en MHz). G_r est le gain de l'antenne de réception (en dB par rapport à une antenne isotrope en espace libre), lequel dépend en particulier de la direction d'arrivée des ondes. Cette direction n'est en général pas déterminée par une mesure, mais prévue. On voit donc que cette manière d'obtenir P_a est moins satisfaisante, puisqu'elle ne conduit pas à des données indépendantes pour contrôler l'exactitude des prévisions.

6.2 *Valeur efficace du champ de l'onde ionosphérique*

Les valeurs mesurées de la tension à l'entrée du récepteur peuvent s'exprimer par les valeurs correspondantes de la tension induite dans l'antenne de réception et, à partir de là, en fonction de celles du champ. Dans le cas de systèmes simples, comme ceux d'une antenne unipolaire verticale, d'un doublet transversal ou fermé sur impédance ou encore d'un cadre, sensibles à une onde à polarisation unique (horizontale ou verticale), il convient d'introduire la notion de champ incident équivalent. On entend par là un champ résultant, de même polarisation que celle à laquelle l'antenne est sensible. On peut le considérer comme la somme d'une onde ionosphérique incidente et d'une onde réfléchie par le sol. Les mesureurs de champ portatifs du commerce sont généralement étalonnés de manière à indiquer le champ incident équivalent. D'autre part, pour les antennes de grandes dimensions constituées d'éléments séparés d'orientations différentes, comme par exemple un losange horizontal, l'expression de «champ incident équivalent» n'a pas de signification physique. Le niveau de signal capté et le champ résultant ne sont pas les mêmes pour les divers éléments. De même, pour le signal capté en dehors de l'axe principal dans le cas d'une antenne simple comme un doublet ou un cadre, la notion de champ incident équivalent n'a pas grand intérêt. L'antenne est alors sensible à des ondes à polarisation elliptique, et les tensions induites ne dépendent pas seulement du champ, mais aussi de l'adaptation entre les polarisations des ondes et celles auxquelles l'antenne est sensible pour les directions d'arrivée à considérer. Des ondes de polarisation et d'intensité différentes provenant de la même direction peuvent ainsi induire la même tension.

La relation entre le champ incident équivalent et la tension induite dans l'antenne de réception fait intervenir la fréquence, mais, contrairement à la relation correspondante pour le champ de l'onde ionosphérique, elle ne dépend ni de la direction d'arrivée de l'onde ni des constantes du sol. Dans les deux cas, le facteur de conversion a les dimensions d'une longueur, de sorte que, lorsque la notion de champ incident équivalent a un sens, il est commode de se rapporter à deux «longueurs équivalentes» de l'antenne. L'une d'elles: l_{ei} relie le champ incident équivalent à la f.é.m. induite dans l'antenne, et l'autre, l_{es} relie le champ de l'onde ionosphérique à cette même f.é.m. La comparaison du champ incident équivalent au champ de l'onde ionosphérique, opération qui équivaut à relier l_{ei} à une valeur appropriée de l_{es}, est une chose généralement compliquée, qui implique des hypothèses sur les amplitudes, les polarisations et les angles d'arrivée prédominants des composantes de l'onde et qui suppose également une connaissance du diagramme de directivité de l'antenne.

Soit:

E_0 : la valeur efficace du champ incident équivalent (en dB(μV/m)),

V: la valeur médiane de la tension aux bornes d'entrée du récepteur (en dB(1 μV)),

l_{ei} étant exprimé en mètres, on peut écrire, en supposant que l'évanouissement est de type Rayleigh:

$$E_0 = V + L + T - 20 \log (l_{ei}) + 7{,}6 \qquad \text{(dB)} \tag{5}$$

Pour une antenne unipolaire verticale de longueur physique l (en mètres), on a:

$$l_{ei} = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi l}{\lambda} \tag{6}$$

On voit que, si $l \ll \lambda$, on a sensiblement $l_{ei} \simeq \frac{l}{2}$

Pour un petit cadre de n spires et d'aire A, orienté dans le plan d'incidence, on a:

$$l_{ei} = \frac{2\pi nA}{\lambda} \tag{7}$$

Si maintenant E est la valeur efficace du champ de l'onde ionosphérique (en dB(μV/m)), et si l_{es} est exprimé en mètres, la comparaison avec la formule (5) conduit à:

$$E = V + L + T - 20 \log (l_{es}) + 7{,}6 \qquad \text{(dB)} \tag{8}$$

Or, l_{es} s'exprime en fonction du gain de l'antenne par rapport à une antenne isotrope en espace libre (g_r) et de la résistance de rayonnement r_a(ohms) par la formule:

$$l_{es}^2 = \frac{g_r \lambda^2 r_a}{120\pi^2} \tag{9}$$

de sorte que, en posant $G_r = 10 \log g_r$, et f étant exprimé en MHz, E peut encore s'écrire:

$$E = V + L + T - G_r - 10 \log r_a + 20 \log f - 11{,}2 \qquad \text{(dB)} \tag{10}$$

La différence entre le champ incident équivalent et le champ de l'onde ionosphérique s'obtient en faisant la différence entre les formules (5) et (10) pour une même valeur de V. C'est ce que montre la Fig. 1 pour les cas d'une courte antenne verticale unipolaire mise à la terre et pour un cadre.

6.3 *Caractéristique du champ préférable pour effectuer une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prévues*

D'après ce que l'on a vu aux § 6.1 et 6.2 ci-dessus, la relation entre les valeurs mesurées et la puissance disponible au récepteur ne fait intervenir que les paramètres du système de réception; au contraire, pour relier les mesures aux valeurs correspondantes du champ de l'onde ionosphérique, on doit connaître les directions d'arrivée des ondes et leurs polarisations. Les directions d'arrivée ne sont normalement pas mesurées, mais doivent être prévues. Il s'ensuit donc que la caractéristique du champ à laquelle il convient de donner la préférence lorsque l'on veut faire des comparaisons avec les prévisions est la puissance disponible au récepteur.

7. Tabulation des données

Il convient que l'organisation qui entreprend les mesures prépare deux ou trois modèles de feuilles de tabulation des données, selon qu'elle désire indiquer à la fois la puissance disponible au récepteur et le champ de l'onde ionosphérique ou seulement l'une de ces deux grandeurs. Nous avons dit plus haut que les tabulations des valeurs du champ incident équivalent ne se prêtent pas directement aux comparaisons avec les prévisions, de sorte qu'il faut les éviter.

7.1 *Renseignements sur les circuits et sur la procédure suivie*

Il convient de fournir les renseignements suivants.

Station d'émission:

Nom et adresse de la station
Coordonnées géographiques
Fréquence porteuse
Indicatif d'appel
Puissance sur l'onde porteuse

Classe de modulation
Puissance rayonnée dans la bande passante du récepteur
Heures d'exploitation
Conductivité et constante diélectrique relative du sol
Type d'antenne, dimensions, orientation et gain dans la direction du grand cercle pour certains angles de site, si on l'a mesuré.

Station de réception:

Nom et adresse de la station
Coordonnées géographiques
Bande passante du récepteur
Type d'équipement enregistreur, vitesse de déroulement, constante de temps d'intégration
Heures d'exploitation
Conductivité et constante diélectrique du sol
Type d'antenne, dimensions, orientation et gain dans la direction du grand cercle pour certains angles de site, si on l'a mesuré.

Distance entre l'émetteur et le récepteur le long de l'arc de grand cercle.

7.2 *Feuilles de tabulation mensuelles de la puissance moyenne disponible au récepteur et de la valeur efficace du champ de l'onde ionosphérique*

Le Tableau I donne un exemple d'une telle feuille. Il convient d'utiliser des feuilles différentes pour indiquer la puissance moyenne disponible au récepteur (exprimée en dB au-dessous de 1 W, c'est-à-dire en dBW négatifs) et la moyenne quadratique du champ de l'onde ionosphérique (exprimée en dB(μV/m)). Les résultats sont valables pour la valeur particulière de la puissance rayonnée par l'émetteur et ne sont pas ramenés à une puissance de référence quelconque. Il convient de donner les résultats séparément pour chaque heure de la journée (en UTC) ainsi que les médianes mensuelles et les quartiles, selon les règles suivantes.

7.2.1 *Tabulations journalières*

Les médianes horaires doivent être arrondies au décibel le plus voisin. Lorsque l'on a des raisons de croire qu'une valeur n'est connue qu'à 2 à 4 dB près, on doit la faire suivre d'un symbole littéral descriptif et la qualifier d'incertaine. Dans le cas où l'on ne peut pas garantir une précision à 4 dB près, on se borne à inscrire le symbole littéral descriptif sans indiquer de valeur numérique. Les symboles littéraux à employer sont les suivants:

- symboles qualificatifs (placés avant la valeur numérique)
  - D : signifie que la valeur numérique est une limite inférieure,
  - E : signifie que la valeur numérique est une limite supérieure,
  - U : signifie que la valeur numérique est incertaine;
- symboles descriptifs (placés après la valeur numérique, ou figurant seul)
  - C : signifie que l'on n'a pas fait de mesure, ou que l'on n'a pas pu en faire en raison d'un ennui technique,
  - S : signifie que la mesure a été influencée, ou rendue impossible, en raison de brouillages ou d'atmosphériques.

7.2.2 *Détermination de la médiane mensuelle et des quartiles*

Les médianes et les quartiles des données journalières sont généralement calculées à l'aide d'un ordinateur. Si l'on n'en dispose pas à la station de réception, on peut faire faire l'évaluation dans un centre de calcul à partir des données transcrites sur cartes perforées (voir le § 7.3). Il convient de ne pas noter de médianes ni de quartiles lorsque l'on dispose de trop peu d'échantillons pour une heure donnée ou bien lorsque les résultats obtenus ne dépassent pas de plus de 2 dB le niveau du bruit de fond à la réception. Pour pouvoir noter une valeur médiane, il faut que l'on ait au moins 5 échantillons et, pour un quartile, il en faut au moins 7.

Si plus de la moitié de toutes les valeurs numériques journalières possibles d'un mois donné font défaut ou sont accompagnés, pour une raison quelconque, d'un symbole qualitatif, les médianes et les quartiles doivent être précédés de la lettre U et accompagnés du symbole littéral descriptif approprié, c'est-à-dire de celui qui convient pour qualifier la majorité des données absentes ou accompagnées d'un tel symbole. Si la médiane ou le quartile ne dépasse le niveau du bruit de fond que de 2 à 4 dB, sa valeur numérique doit aussi être précédée par le symbole U et suivie par le symbole S.

TABLEAU I – *Tableau mensuel*

Emplacement de l'émetteur _____ Emplacement du récepteur _____ Fréquence _____

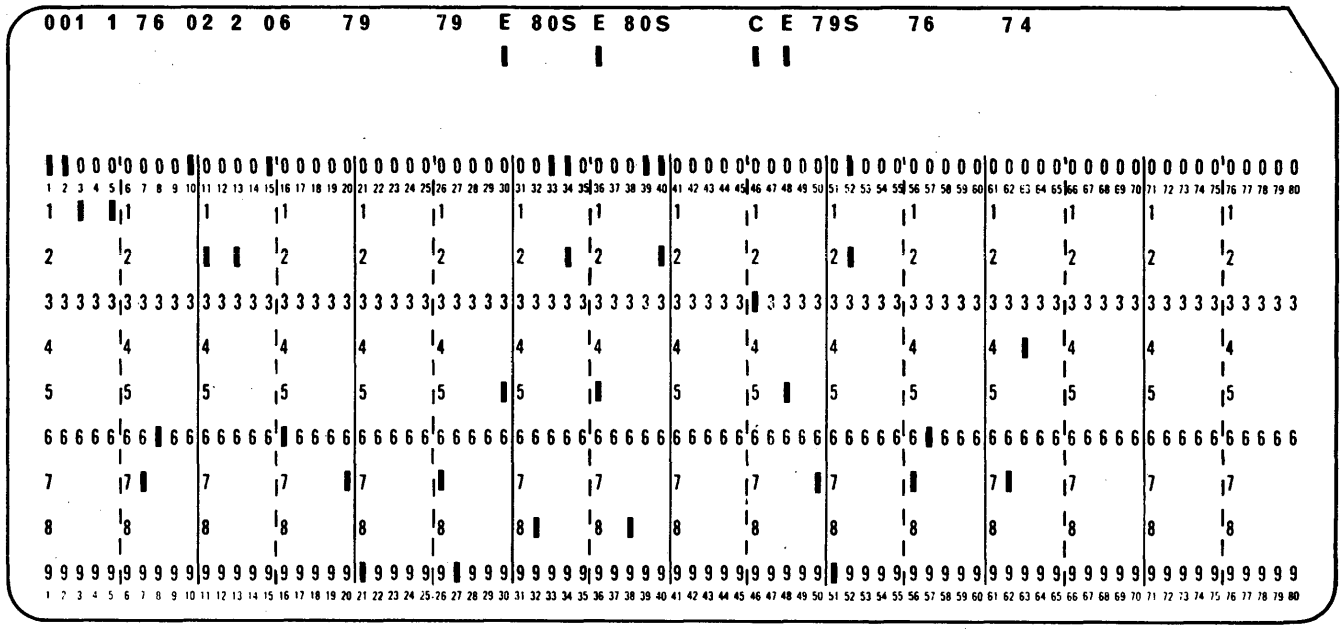
Année _____ Mois _____ Paramètre _____

Heure (UTC) / Jour	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								
18																								
19																								
20																								
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31																								
Base																								
Médiane																								
Quartile inférieur																								
Quartile supérieur																								

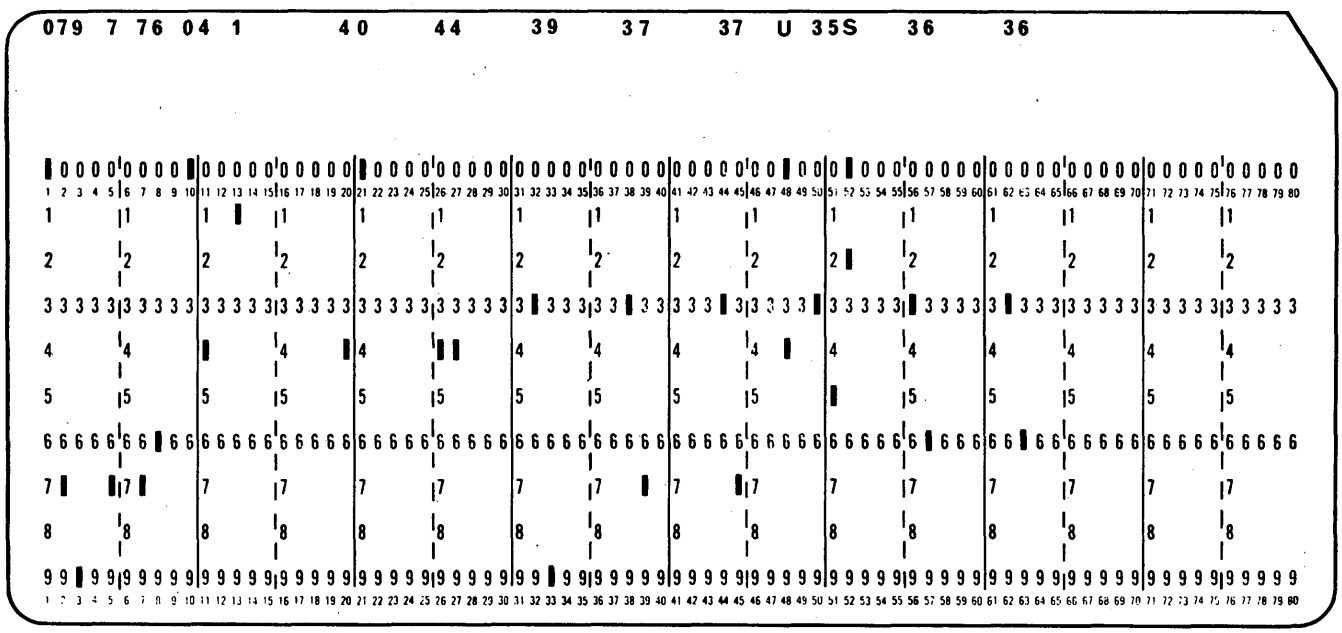
Pour déterminer l'amplitude médiane, on range les valeurs journalières par ordre croissant, celles accompagnées de la lettre E figurant au début et celles accompagnées de la lettre D figurant à la fin. Si le nombre des échantillons est impair, celui qui se trouve au milieu est la médiane; s'il est pair, on prend pour médiane la moyenne des deux valeurs centrales. Le quartile supérieur et le quartile inférieur sont respectivement les médianes de la moitié supérieure et de la moitié inférieure des échantillons rangés comme il a été dit plus haut. Il existe certaines règles pour traiter les cas où les valeurs numériques précédées de la lettre D sont inférieures au quartile inférieur et ceux où les valeurs numériques accompagnées de la lettre E sont supérieures au quartile supérieur. Ces règles figurent dans un ouvrage [Piggott et Rawer, 1972 et 1978] relatif au traitement des données d'ionogrammes, mais s'appliquent aussi bien dans le domaine dont traite le présent Rapport. Les valeurs des médianes et des quartiles doivent être arrondies au décibel le plus voisin.

7.3 *Tabulation des données à traiter par ordinateur*

On a intérêt, en vue du stockage et de l'analyse des données, à mettre les résultats de mesure sous une forme qui se prête au traitement par ordinateur. Certaines méthodes, qui font appel à des terminaux éloignés, permettent de numériser les enregistrements et d'introduire directement les résultats dans un ordinateur. Pour l'échange international des données, le mieux est d'utiliser des cartes perforées ou des bandes magnétiques. Les organisations sont invitées à communiquer leurs résultats de mesure à la Banque de données en utilisant le modèle de carte représenté sur les exemples de la Fig. 2. Trois cartes contiennent les résultats relatifs à un paramètre mesuré pour une journée. On utilise des cartes différentes pour les médianes et pour les quartiles.



a) Valeurs journalières de la puissance disponible au récepteur: Circuit 1, 08-15 UTC, 6 février 1976



b) Valeurs mensuelles du quartile inférieur de la valeur quadratique moyenne du champ de l'onde ionosphérique: Circuit 79, 00-07 UTC, avril 1976

FIGURE 2 – *Exemples de cartes utilisées pour la transcription des résultats de mesure de champ*

Légende de la Fig. 2

Colonnes 1 à 3	Code désignant le circuit et la fréquence (numéro d'identification fourni par le Secrétariat du CCIR)
Colonne 5	Type de donnée: 1 = puissance disponible au récepteur – valeurs journalières 2 = champ de l'onde ionosphérique (valeur quadratique moyenne) – valeurs journalières 3 = puissance disponible au récepteur – valeurs mensuelles 4 = puissance disponible au récepteur – quartiles inférieurs 5 = puissance disponible au récepteur – quartiles supérieurs 6 = champ de l'onde ionosphérique (valeur quadratique moyenne) – médianes mensuelles 7 = champ de l'onde ionosphérique (valeur quadratique moyenne) – quartiles inférieurs 8 = champ de l'onde ionosphérique (valeur quadratique moyenne) – quartiles supérieurs
Colonnes 7 et 8	Année (deux chiffres)
Colonnes 10 et 11	Mois (deux chiffres, de 01 à 12)
Colonne 13	Heures 1 = 00-07 UTC 2 = 08-15 UTC 3 = 16-23 UTC
Colonnes 15 et 16	Quantième (jour)
Autres colonnes	Données: 8 ensembles d'au plus 5 caractères occupant les colonnes 18-22, 24-28, 30-34, 36-40, 42-46, 48-52, 54-58 et 60-64 Caractères: 1 symbole littéral qualificatif (ou espace) 2 données: centaines 3 données: dizaines 4 données: unités 5 symbole littéral descriptif (ou espace)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRADLEY, P. A. [1968] Wave polarisation and its influence on the power available from a radio signal propagated through the ionosphere – 2, *Proc. IEE*, **115(6)**, 777-781.

MITRA, A. P. [1970] HF ad VHF absorption techniques in radio wave probing of the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 623-646.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] URSI handbook of ionogram interpretation and reduction (2nd. Ed.), World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, Colorado 80302, Etats-Unis d'Amérique. Pour le texte français, s'adresser au CNET, France et pour le texte espagnol, à LIARA, Argentine.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] URSI handbook of ionogram interpretation and reduction (2nd. Ed.), révision du Chapitre 1-4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Rep. UAG-23G, NOAA, Boulder, Colo. 80303, Etats-Unis d'Amérique.

RAWER, K., DIEMINGER, W., LAUTER, E. A., MASS, J., SCHLEGEL, K., SCHWENTEK, H. et TAUBENHEIM, J. [1976] Manual on ionospheric absorption measurements, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Rep. UAG-57, NOAA, Boulder, Colorado 80302, Etats-Unis d'Amérique.

SHAPLEY, A. H., PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1974] Absorption data for the IGY/IGC and IQSY, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Rep. UAG-34, NOAA, Boulder, Colorado 80303, Etats-Unis d'Amérique.

WAKAI, N., FUJII, S. et MIYAMOTO, Y. [1971] Measurement of the field intensity of HF radio waves by means of a narrow band receiver, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. **18**, 183-190.

RAPPORT 571-3

COMPARAISONS ENTRE LES VALEURS OBSERVÉES ET LES VALEURS CALCULÉES DES INTENSITÉS DES SIGNAUX TRANSMIS PAR L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 2 ET 30 MHz

(Programme d'études 30A/6, Vœu 45)

(1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport expose brièvement des comparaisons qui ont été faites entre les valeurs observées et calculées de l'intensité des signaux transmis par l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre 2 et 30 MHz. Ces comparaisons fournissent des renseignements sur la fiabilité des diverses méthodes de prévision et sur les améliorations qu'il serait souhaitable d'apporter aux procédures du CCIR. Il importe que les administrations et organisations intéressées tiennent le CCIR au courant de l'état actuel de leurs comparaisons.

2. Intensité du signal sous incidence verticale

2.1 En URSS [CCIR, 1970-74a], on a comparé les valeurs calculées et observées de l'absorption sous incidence verticale, en appliquant quatre méthodes de prévision. Cette comparaison a mis en évidence des différences importantes d'une méthode à une autre; elle a montré que l'écart entre les valeurs calculées et observées de l'absorption peut atteindre 25 dB à 2,4 et 4,0 MHz, et 20 dB à 4,5 MHz à une distance de 50 km [CCIR, 1978-82a].

2.2 Les valeurs de l'absorption ionosphérique données par les méthodes du DSIR, de l'AIR et du CCIR, ont été comparées au Royaume-Uni. Alors que les résultats sont voisins pour les modes F, on observe de grandes différences pour les modes E [CCIR, 1970-74b].

3. Intensité du signal sous incidence oblique

3.1 *Latitudes tempérées*

3.1.1 Une étude effectuée au Royaume-Uni [Bradley et Howard, 1973], décrit des mesures de champ faites d'août 1968 à juillet 1969 sur un trajet de 3260 km à une latitude tempérée (entre Chypre et Slough) avec des transmissions d'impulsions sur 9,9, 17,5 et 23,0 MHz. Les valeurs mesurées de l'absorption pour les modes 1F2 et 2F2 y sont comparées avec les valeurs calculées selon les méthodes de Piggott [1959], Lucas et Haydon [1966] et Barghausen et autres [1969]. De façon générale, les valeurs mesurées sont supérieures aux valeurs prévues, en particulier la nuit. Pour les trois jeux de prévisions, les moyennes de l'absorption, établies sur toutes les heures, sont trop basses respectivement de 7,5 dB, 6,5 dB et 8,0 dB. Une autre méthode de prévision, fondée sur les travaux de George et Bradley [1973], conduit à des valeurs calculées quelque peu supérieures pour les fréquences les plus basses et pour le mode 1F2. L'écart correspondant n'est plus que de 5 dB.

Les observations fournissent une valeur médiane du surcroît d'affaiblissement de transmission égale à 6 dB tandis que la valeur correspondante obtenue par la méthode provisoire du CCIR (Rapport 252) donne 9,5 dB pour ce même trajet.

3.1.2 Les mesures d'absorption effectuées en République fédérale d'Allemagne pendant un cycle solaire complet ont conduit à une formule qui décrit l'anomalie d'hiver pour les latitudes moyennes de l'hémisphère nord et sa relation avec l'activité solaire. Les mesures effectuées à bord d'un navire dans l'Atlantique oriental ont montré que la limite sud de l'anomalie hivernale se trouve entre 30° et 40° de latitude nord [Elling et autres, 1973; Röttger et Schwentek, 1974].

3.1.3 Pour des fréquences de travail supérieures à la MUF de référence, le Centre technique des télécommunications (FTZ) de l'Administration fédérale allemande [CCIR, 1966-69], a mis au point une méthode pour la prévision du champ, fondée sur des cartes numériques établies pour MUF d'exploitation = $K \times$ MUF de référence, où K est coefficient empirique, dont une expression améliorée se trouve dans le Doc. [CCIR, 1970-74c]. Les valeurs mesurées du champ créé à Hiraïso (Japon) par des émissions de la station WWV diffèrent de moins de 20 dB des valeurs du champ calculées avec ce coefficient amélioré. Cet écart est ramené à moins de 10 dB si l'on applique les valeurs de la MUF de référence mesurées au Japon au lieu de celles données par les cartes numériques.

3.2 *Basses latitudes*

3.2.1 Les champs mesurés correspondant à divers trajets, en Inde, ont été comparés avec les valeurs calculées par les méthodes du CRPL [1948], du SPIM [Rawer, 1952], du RPU-9 [Laitinen et Haydon, 1950], du DSIR [Piggott, 1959] et de l'AIR [Rao, 1969]. Les valeurs calculées par les méthodes de l'AIR et du DSIR sont très voisines des valeurs mesurées, alors que les méthodes du CRPL, du SPIM et du RPU-9 donnent des écarts considérables [CCIR, 1962a et 1963].

3.2.2 Pendant une période d'environ douze mois, les champs de sept stations différentes ont été mesurés par le «Departement of Scientific and Industrial Research» à Singapour et on a déterminé leur valeur médiane mensuelle pour chaque heure. Les champs ont été calculés par la méthode du CRPL et par celle du RPU-9 [CCIR, 1962b]. Les deux méthodes donnent pour le jour des courbes d'allure très semblable à celle des courbes relevées expérimentalement, mais les deux champs présentent des différences pouvant aller jusqu'à 6 dB. Les valeurs obtenues par la méthode du CRPL sont en général inférieures aux valeurs mesurées, tandis que celles données par la méthode du RPU-9 sont plus élevées que les valeurs mesurées.

3.2.3 On a calculé l'absorption sous incidence oblique au moyen d'une méthode précise de trajectographie, en se fondant sur une répartition des électrons dans l'ionosphère diurne équatoriale pour l'intensité minimale de l'activité solaire. Cette répartition est basée sur:

- les données des sondages ionosphériques sous incidence verticale pour la couche E,
- les données fournies par des fusées à des altitudes inférieures, données corrigées pour être valables à l'altitude virtuelle sous incidence verticale et correspondre à des mesures de l'absorption faites dans un certain nombre de stations équatoriales [CCIR, 1970-74d].

Les calculs, qui portent sur des distances de propagation allant jusqu'à 800 km et sur des fréquences des bandes spéciales attribuées à la radiodiffusion dans la Zone tropicale à 2,4 MHz, 3,3 MHz et 5,0 MHz, indiquent que:

- pour le mode 1E, la formule du DSIR donne des valeurs de l'absorption ionosphérique dont l'erreur est systématiquement inférieure à 6 dB, alors que la formule de l'AIR mène à des absorptions beaucoup trop grandes (erreurs allant de 10 à 160 dB). La formule du CCIR (voir le Rapport 252) conduit elle aussi à des valeurs beaucoup trop élevées de l'absorption dans les régions voisines de la limite de la zone de service (erreurs allant de 40 à 80 dB), bien que, aux distances égales ou inférieures à 100 km, la précision des résultats qu'elle permet d'obtenir soit comparable à celle obtenue avec la formule du DSIR;
- pour le mode 1F, les trois méthodes ci-dessus mentionnées permettent une prévision exacte de l'absorption, avec des erreurs de 6 dB, voire moins.

3.2.4 On a mesuré, à Delhi, dans les bandes des fréquences les plus basses attribuées à la radiodiffusion en ondes décamétriques, le champ de quelques émetteurs régionaux à ondes décamétriques de All India Radio; ces mesures ont montré que la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées du champ est meilleure avec la méthode AIR qu'avec la première méthode provisoire du Rapport 252, lorsque la propagation se fait par la couche F. Le champ calculé selon la méthode AIR a tendance à s'écarter de plus en plus de la valeur mesurée lorsque la fréquence d'émission diminue et lorsque le mode de propagation passe de F à E. Les différences entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées selon la méthode du CCIR sont également importantes en cas de propagation par la couche E [CCIR, 1974-78a].

4. Comparaisons établies à l'aide des méthodes d'évaluation du Rapport 252 et de son Supplément

4.1 *Comparaisons générales*

4.1.1 Deutsche Welle, République fédérale d'Allemagne, a fait des comparaisons entre les prévisions (utilisant la méthode intérimaire du Rapport 252) et les évaluations SINPO des champs d'émissions de radiodiffusion reçus à des distances comprises entre 6000 et 23 000 km pendant la période 1971 à 1973. En général, l'accord semblait bon pour des distances jusqu'à 12 000 km mais les valeurs prévues étaient systématiquement trop basses pour des distances plus grandes.

De plus, des comparaisons entre les performances de circuit prévues et observées durant un cycle solaire entier (de novembre 1963 à septembre 1974) sur différentes liaisons entre 6000 et 24 000 km montrent des écarts systématiques. On a pu distinguer si ces écarts étaient dus à des erreurs de prévisions, soit de la MUF, soit du champ [CCIR, 1974-78b].

Sur les trajets du grand cercle longs et courts entre Wertachtal (République fédérale d'Allemagne) et Melbourne (Australie), on a constaté que les valeurs de champ observées dépassaient les valeurs calculées et que la différence pouvait atteindre 25 dB. Sur le trajet court, on peut éliminer la différence en prenant en considération le gain de focalisation [Hortenbach, 1977]. Pour le trajet long, on a pu obtenir une concordance entre les valeurs précitées en supposant, en plus du gain de focalisation, des modes de propagation avec inclinaison de l'onde sans réflexion additionnelle intermédiaire par le sol [Hortenbach et Rogler, 1979] (voir également le Rapport 250).

4.1.2 En URSS, on a comparé les valeurs de champ observées et calculées par la méthode provisoire du CCIR. Les liaisons concernées étaient établies sur des distances de 2000 à 14 000 km et à des fréquences comprises entre 2,5 et 15 MHz. On a constaté des écarts importants (en moyenne 10 dB) entre les valeurs calculées et mesurées.

4.1.3 On a comparé les valeurs du champ mesuré à Delhi pour quelques émetteurs régionaux à ondes décamétriques de AIR avec les valeurs calculées selon la formule de la deuxième méthode informatique provisoire du CCIR (voir le Supplément au Rapport 252). La comparaison met en évidence une bonne corrélation dans le cas de propagation par la couche F et la couche E. Cette deuxième méthode provisoire du CCIR semble donc extrêmenent prometteuse et pourrait aussi être appliquée utilement aux circuits de la Zone tropicale. Toutefois, comme la comparaison a porté sur un petit nombre de données, il n'est pas possible de formuler une opinion définitive [CCIR, 1974-78c].

4.1.4 En URSS, on a comparé les pertes d'énergie prévues sur des liaisons radioélectriques à ondes décamétriques à haute latitude, dues à l'absorption aurorale et les valeurs déduites de mesures [CCIR, 1982-86a]. Des calculs ont été faits en utilisant deux méthodes: la méthode Foppiano comprise dans la méthode du CCIR (Supplément au Rapport 252) et la méthode mise au point en URSS [Joulina et autres, 1983; CCIR, 1982-86b]. Les résultats montrent que, pour l'absorption prévue exprimée en décibels, la première méthode donne des erreurs de plus de 40% dans approximativement 45% des cas, contre environ 10% des cas avec la deuxième méthode.

4.2 *Comparaisons établies à l'aide de la Banque de données du CCIR*

4.2.1 Le Groupe de travail intérimaire 6/1 a procédé à une analyse des valeurs efficaces du champ de l'onde ionosphérique et de la puissance moyenne disponible à la réception, obtenues au moyen de mesures, et des valeurs estimées en appliquant la méthode du Rapport 252. Il a examiné un échantillon représentatif des données mesurées, déposées dans la banque de données du CCIR, pour 16 trajets (Tableau I) de 450 à 16 200 km. Il a étudié les méthodes d'étalonnage utilisées pour le calcul de ces données et les méthodes de mesure ont été normalisées pour donner les médianes mensuelles correspondantes du champ et de la puissance pour 1 kW rayonné par une antenne d'émission isotrope.

Par ailleurs, en Argentine [Pérès, 1978], en République fédérale d'Allemagne et au Royaume-Uni, on a séparément procédé à une comparaison des valeurs prévues au moyen de la méthode du Rapport 252, en utilisant le programme d'ordinateur HFMLOSS. Les résultats de ces comparaisons concordent entièrement. Les chercheurs se sont limités à l'analyse des cas dans lesquels le champ des signaux a été mesuré et où les prévisions indiquent leur présence pour plus de la moitié des jours du mois. Il semble que les différences entre valeurs prévues et valeurs mesurées varient selon l'heure, la saison et la longueur du trajet, les champs prévus ayant tendance à dépasser la nuit et en hiver, les champs mesurés; de plus, ces différences augmentent avec la longueur des trajets. Cependant l'influence sur les résultats n'est pas considérable, comparée à leur dispersion.

D'autres comparaisons correspondantes portant sur la puissance à la réception ont été faites au Royaume-Uni [Dick et Hurst, 1980] à l'aide du programme d'ordinateur RIM1A (version développée de HFMLOSS qui prend en considération les gains d'antenne) récemment établi par le personnel spécialisé de l'IFRB. Ce programme comprend le calcul du gain de l'antenne de réception, ce qui permet d'éviter l'adoption de valeurs fondées sur des directions moyennes supposées des ondes d'arrivée; on a utilisé les données relatives aux circuits 1 à 15 du Tableau I. Ces essais n'ont fourni que peu de preuves à l'appui de légères variations systématiques des divergences des prévisions avec la fréquence, l'heure et la saison. La longueur du trajet n'a pas d'influence évidente.

Le meilleur résumé des résultats que l'on puisse présenter est un histogramme combiné des différences pour toutes les heures, toutes les fréquences, tous les mois et tous les circuits groupés (voir la Fig. 1). Pour les comparaisons de champ, la divergence médiane correspond à un champ prévu supérieur de 3 dB à la valeur mesurée. Dans 70% des cas, les divergences sont inférieures à 10 dB et, dans 90% des cas, elles sont inférieures à 20 dB. Pour les comparaisons de puissance, elle correspond à une puissance prévue supérieure de 1,5 dB à la puissance mesurée. Dans 60% des cas, les divergences sont inférieures à 10 dB et, dans 85% des cas, à 20 dB.

A titre d'exemples entre les prévisions et les mesures pour des trajets situés dans les régions différentes, les données relatives à toutes les heures et tous les mois étant combinées, la Fig. 2 présente les histogrammes de la puissance de réception (prévue moins mesurée) pour des circuits échantillons dont les uns traversent la zone tropicale et dont les autres sont situés à des latitudes moyennes ou élevées. Le compte des échantillons est indiqué, ainsi que les moyennes et les moyennes quadratiques des différences.

TABLEAU I — *Echantillon représentatif des données mesurées déposées dans la banque de données du CCIR*

N°	Circuit	Distance (km)	Fréquences (MHz)	Année
1	Tokyo—Akita	448	5,0, 2,5	1971
2	Bracknell—Luchow	846	18,3, 9,2, 4,8, 2,6	1975
3	Shannon—Luchow	1 346	5,5	1973
4	Moscou—Luchow	1 707	15,9, 7,7, 5,4, 3,9	1976
5	Halifax—Luchow	5 301	22,4, 12,8, 8,5, 6,4	1974
6	Kauai—Hiraiso	5 908	15,0	1974
7	New York—Luchow	6 174	20,9, 16,2, 13,6	1973
8	Maui—Hiraiso	6 271	15,0	1969
9	Brazzaville—Luchow	6 383	22,0	1972
10	Nairobi—Luchow	6 494	17,4, 9,0	1972
11	Tokyo—Luchow	8 994	22,8, 13,6, 10,0, 3,6	1971
12	Fort Collins—Hiraiso	9 146	15,0	1974
13	Mauritius—Luchow	9 287	22,6, 13,0, 8,6	1975
14	Washington—Hiraiso	10 797	15,0	1966
15	Honolulu—Luchow	11 677	13,9	1974
16	Canberra—Luchow	16 200	19,7, 13,9, 11,0, 5,1	1975

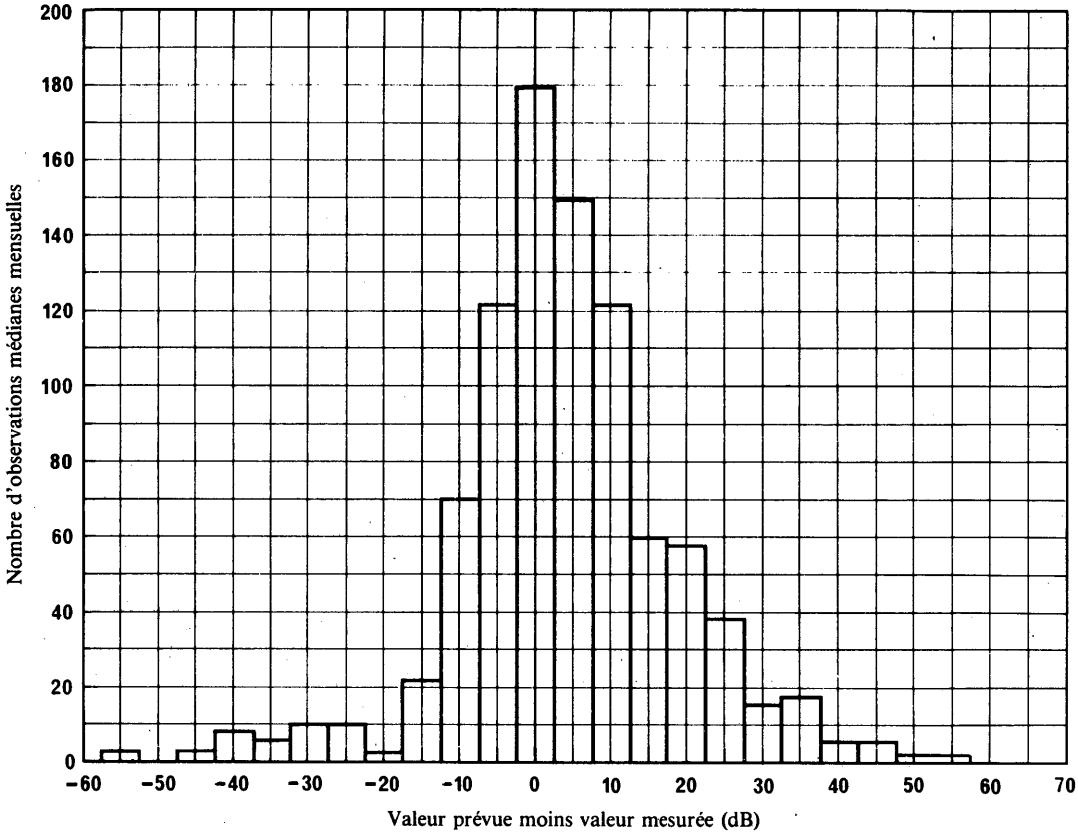
4.2.2 Le Doc. [CCIR, 1970-74e] décrit les comparaisons faites entre les valeurs du champ calculées par la méthode provisoire du CCIR et celles mesurées à 3 fréquences (5, 10 et 15 MHz) dans les quatre saisons de l'année et pour diverses époques du cycle d'activité solaire, comme il ressort du tableau présenté dans ce document. Les valeurs calculées concordent généralement bien avec les valeurs observées, mais la comparaison incite à tenir compte des points suivants pour la révision du Rapport 252:

- à 5 MHz, sur un trajet de transmission relativement court, les valeurs calculées sont supérieures de moins de 5 dB aux valeurs mesurées;
- à 10 MHz, toujours sur un trajet court (1000 km environ), les valeurs calculées sont inférieures à celles mesurées au minimum de l'activité solaire, tandis qu'au maximum de l'activité solaire l'exposant de $\cos \chi$, dans la formule exprimant l'absorption est trop petit;
- à 15 MHz, sur le trajet station WWVH-Hiraïso (6300 km environ), les valeurs concordent bien, sauf au printemps, où les valeurs calculées sont inférieures (de moins de 5 dB) à celles mesurées;
- à 15 MHz, sur le trajet WWV-Hiraïso (10 000 km environ), on constate aussi une bonne concordance des valeurs. Cependant, les valeurs mesurées du champ donnent à penser que le calcul de la MUF devrait être amélioré, car on observe un champ élevé même quand la fréquence de travail dépasse la MUF de référence du circuit. Il y a lieu de noter qu'on peut diminuer cet écart en tenant compte de l'influence de la longueur du trajet sur le champ à la réception.

5. Comparaisons établies à l'aide de méthodes d'évaluation mises au point à partir du Rapport 252 et de son Supplément

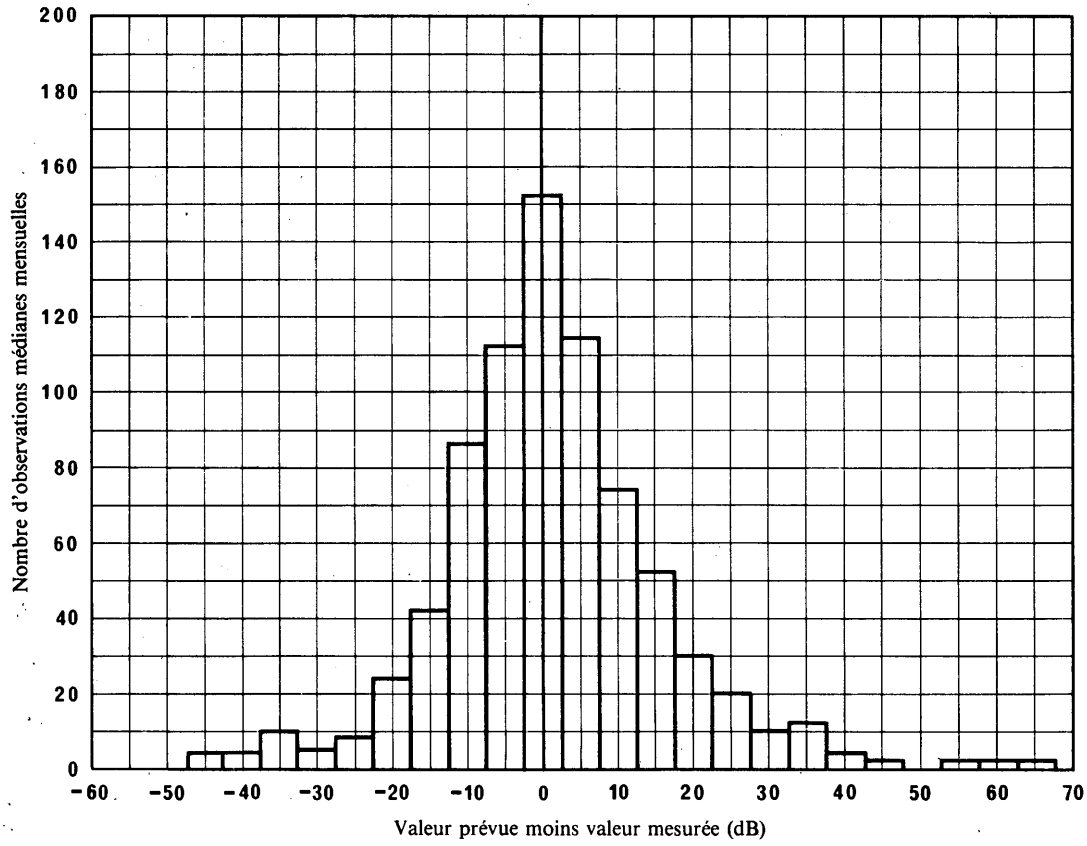
5.1 *Comparaisons générales*

Les mesures du champ effectuées en Inde pour un certain nombre d'émetteurs indiens et étrangers dans la gamme de fréquences de 3 à 12 MHz et à des distances allant de 300 à 3000 km [CCIR, 1978-82b] ont été comparées par «All India Radio» au moyen d'une méthode [CCIR, 1978-82c] qui est une adaptation manuelle simplifiée de la méthode du CCIR décrite dans le Supplément au Rapport 252 pour les circuits à un seul bond. Cette méthode tient compte du gain des antennes d'émission, de l'affaiblissement spatial, du gain dû à la focalisation, de l'absorption avec et sans déviation et d'un affaiblissement constant par couplage de polarisation de 3 dB. Les affaiblissements dus à la couche E sporadique et les affaiblissements aux fréquences supérieures à la MUF ne sont pas pris en considération. Dans la plupart des cas on a constaté que les valeurs mesurées étaient à $\pm$ 3 dB des valeurs calculées. On a conclu que la méthode de prévision pouvait être utilisée dans la zone tropicale.



a) comparaison des champs (résultats de travaux faits en Argentine)

A = 922 B = 3 C = 15



b) Comparaison de puissances de réception (résultats de travaux faits au Royaume-Uni)

A = 922 B = 1,5 C = 14

FIGURE 1 – *Différences entre les valeurs fournies par la méthode de prévision du Rapport 252 et les données de mesure contenues dans la banque de données du CCIR*

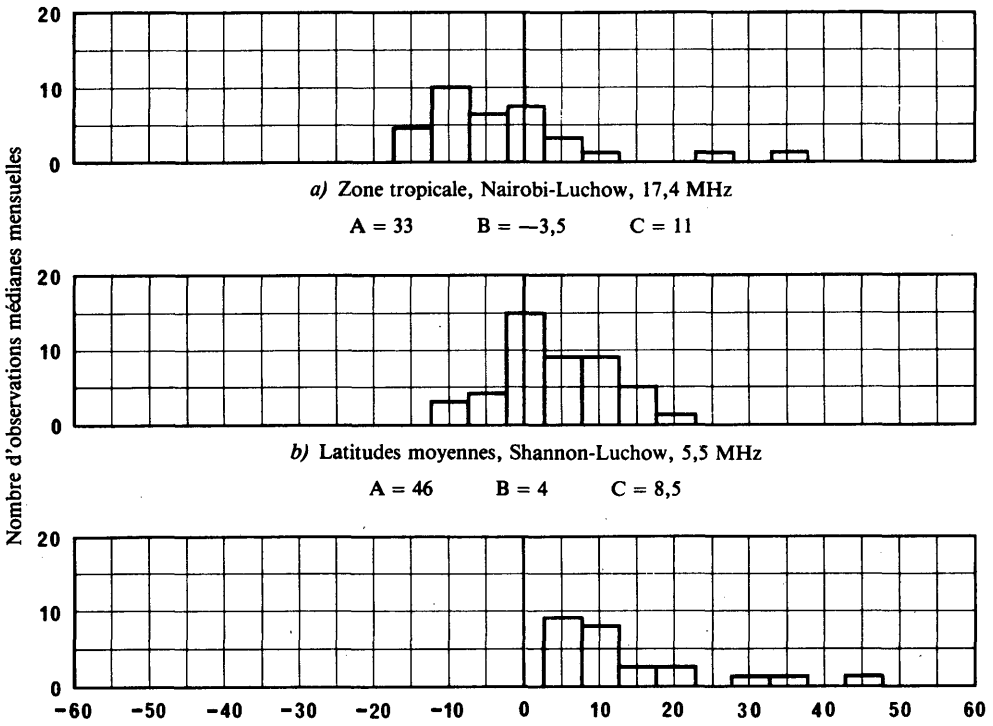


FIGURE 2 – *Comparaisons entre les puissances moyennes à la réception et les valeurs prévues par la méthode du Rapport 252 pour des données échantillons, pour des circuits traversant la zone tropicale et pour des circuits situés à des latitudes moyennes ou élevées.*

A: compte des échantillons
B: différence moyenne (dB)
C: différence moyenne quadratique (dB)

5.2 *Comparaisons établies à l'aide de la banque de données du CCIR*

5.2.1 D'autres comparaisons ont été effectuées en Argentine [Pérès et Finkelberg, 1968] entre les données de champ mesurées pour les circuits 1 à 15 du Tableau I et les valeurs évaluées à l'aide d'une version modifiée de la méthode indiquée dans le Rapport 252. Cette version est différente du seul fait qu'elle a recours à la procédure d'évaluation de l'absorption décrite dans le Supplément au Rapport 252. Les valeurs prévues tendent en général à être supérieures aux valeurs mesurées; l'écart médian pour tous les circuits, les fréquences et les temps est de 6 dB. En comparaison, les valeurs calculées à l'aide de la méthode du Rapport 252, sans modification, concordent généralement mieux avec les valeurs mesurées, comme le montre la Fig. 1a. Par ailleurs, la diffusion des écarts est moindre si l'on utilise la procédure modifiée.

5.2.2 Des comparaisons semblables ont été effectuées en Australie entre les données du champ pour certains circuits du Tableau I (circuits 2, 3, 4, 5, 9 et 13) et celles calculées à l'aide d'une procédure faisant intervenir les caractéristiques fondamentales suivantes du Supplément au Rapport 252 [Caruana, 1980]: formules de MUF, facteur d'absorption, réflexion par le sol et affaiblissement par polarisation. La méthode ne tient pas compte de l'absorption aurorale par la couche E sporadique, ni de l'affaiblissement aux fréquences supérieures à la MUF, mais utilise les données ionosphériques australiennes. En général, on a constaté que les champs calculés étaient de 10 à 20 dB supérieurs aux champs mesurés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W., PROCTOR, L. L. et SCHULTZ, L. D. [1969] Predicting long-term operational parameters of high frequency skywave telecommunication systems. ESSA Tech. Rep. ERL 110-ITS 78, US Govt. Printing Office, Washington DC, 20402.

BRADLEY, P. A. et HOWARD, D. R. [1973] Transmission loss at high frequencies on 3260 km temperate-latitude path. *Proc. IEE*, **120**, 173-180.

CARUANA, J. [1980] Comparisons between measured and computed HF field-strengths. CCIR, GTI 6/1, Doc. 15.

CRPL [1948] NBS Circular N° 462. U.S. Dept of Commerce, Washington DC, 20402.

DICK, M. I. et HURST, E. [1980] Results of comparisons between measured HF mean available receiver power data and values estimated by the method of Report 252-2, GTI 6/1, Doc. 106.

ELLING, W., GEISWEID, K. H. et SCHWENTEK, H. [1973] The southern boundary region of the winter anomaly in ionospheric absorption in winter 1971/1972 observed on board the cargo vessel HANAU of HAPAG-LLOYD moving between 10° and 55° N. *Mitteilung aus dem Max-Planck-Institut für Aeronomie*, **51**.

GEORGE, P. L. et BRADLEY, P. A. [1973] Relationship between HF absorption at vertical and oblique incidence. *Proc. IEE*, **120**, 1355-1361.

HORTENBACH, K. J. [1977] Einfache Korrekturformel zur Berücksichtigung der Fokussierung in Antipodenbereich bei ionosphärischen Vorhersage Verfahren (Formule simplifiée de correction tenant compte de la focalisation aux antipodes pour la prévision du comportement de l'onde ionosphérique). *Rundfunktechn. Mitt.*, Vol. 21, **4**, 169-171.

HORTENBACH, K. J. et ROGLER, F. [1979] Propagation à très grande distance des ondes courtes: prévisions et observations. *J. des Télécomm.*, Vol. 46, **6**, 320-329.

JOULINA, E. M., KICHTCHA, P. V., LOUKACHTEINE, V. M. et CHIROTCHKOV, A. V. [1983] Dopolnitelnye energuetitcheskie poteri na vyssokochirotnykh radioliniakh (Pertes énergétiques supplémentaires sur les liaisons radioélectriques aux hautes latitudes), 208. Maison d'édition Naouka, Moscou, URSS.

LAITINEN, P. O. et HAYDON, G. W. [1950] Analysis and prediction of sky-wave field intensities in the high frequency band. Tech. Rep. 9. US Army Signal Corps Radio Prop. Agency. Ft. Monmouth. NJ, Etats-Unis d'Amérique.

LUCAS, D. L. et HAYDON, G. W. [1966] Predicting statistical performance indexes for high frequency ionospheric telecommunications systems. ESSA Tech. Rep. ITSA-1. US Govt. Printing Office, Washington DC, 20402.

PÉRÈS, M. [1978] Results of comparisons between measured HF field strength data, and values estimated by the method of Report 252-2, GTI 6/1, Doc. 76.

PÉRÈS, M. et FINKELBERG, L. [1981] Evaluation des méthodes du CCIR pour la prévision de l'absorption, *Geoacta*, Vol. XI.

PIGGOTT, W. R. [1959] The calculation of the medium skywave field-strength in tropical regions. Radio Research Special Report No. 27, HMSO Londres, Royaume-Uni.

RAO, M. K. [1969] Nomographs for calculation of field strength. *J. Inst. Telecomm. Engrs.* (India), **15**, 729.

RAWER, K. [1952] Calculation of sky-wave field strength. *Wireless Engineer*, **29**, 287-301.

RÖTTGER, J. et SCHWENTEK, H. [1974] A numerical description of the winter anomaly in ionospheric absorption for a sunspot cycle. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. **36**, 363-366.

Documents du CCIR

[1962]: **a.** XII/9 (Inde); **b.** XII/18 (Royaume-Uni).

[1963]: XII/98 (Inde).

[1966-69]: VI/57 (Allemagne (République fédérale d')).

[1970-74]: **a.** 6/89 (URSS); **b.** 10/1 (Royaume-Uni); **c.** 6/60 (Allemagne (République fédérale d')); **d.** 10/16 (Royaume-Uni); **e.** 6/65 (Japon).

[1974-78]: **a.** 10/56 (Inde); **b.** 6/88 (Allemagne (République fédérale d')); **c.** 10/323 (Inde).

[1978-82]: **a.** 6/223 (URSS); **b.** 6/77 (Inde); **c.** 6/76 (Inde).

[1982-86]: **a.** 6/51 (URSS); **b.** 6/48 (URSS).

RAPPORT 729-2

ÉVALUATION DU CHAMP ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,5 MHz: ÉTAT DE LA QUESTION

(Programme d'études 30A/6)

(1978-1982-1986)

L'objet du présent Rapport est de signaler les nouveautés qui méritent d'être prises en considération lors de toute révision de la deuxième méthode provisoire du CCIR pour l'évaluation, par ordinateur, du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique aux fréquences comprises entre 2 et 30 MHz, et de noter les limitations de ladite méthode.

1. Introduction

Le Rapport 252, qui a été adopté par le CCIR à New Dehli en 1970, décrit une méthode provisoire pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre les limites approximatives de 2 et 30 MHz. Le Groupe de travail intérimaire 6/1 (GTI 6/1) a été chargé de mettre au point une méthode plus précise que celle-ci. Une deuxième méthode provisoire (supplément au Rapport 252) fondée sur l'utilisation d'un ordinateur, a donc été élaborée en suivant le plan indiqué dans le Rapport 572 (Genève, 1974). Aux termes de la Décision 6, le GTI 6/1 doit évaluer et contrôler le domaine de validité des prévisions établies par cette deuxième méthode en les comparant à des mesures de champ; il doit également apporter à cette méthode les améliorations qu'il estime souhaitables. L'objet du présent Rapport est de faire connaître les nouveautés qu'il apparaît souhaitable d'explorer plus à fond à l'occasion de toute révision de la deuxième méthode, et de prendre note des limitations qu'elle comporte et qu'il faut faire disparaître.

2. Mise à jour en conformité avec des textes du CCIR

La deuxième méthode, comme la première, est fondée sur la détermination des modes de propagation des ondes entre l'émetteur et le récepteur. Pour évaluer les trajets des rayons, on se sert de modèles des distributions de la concentration électronique en fonction de la hauteur, élaborés à partir des valeurs prévues des caractéristiques ionosphériques normales sous incidence verticale [Piggott et Rawer, 1972]. On en déduit alors, pour chaque mode de propagation, la valeur du champ en fonction des principaux facteurs d'affaiblissement et de gain connus pour leur importance. Les procédures suivies et toutes les données prises comme références doivent être en accord avec les textes pertinents les plus récents du CCIR, et notamment avec le Rapport 340: «Atlas CCIR des caractéristiques ionosphériques», la Recommandation 371: «Choix d'indices pour les prévisions ionosphériques à long terme», le Rapport 255: «Prévisions à long terme de la propagation ionosphérique» et le Rapport 259: «Propagation des ondes métriques par l'intermédiaire des couches normales, de l'ionisation sporadique de la région E ou d'autres phénomènes d'ionisation anormale».

3. Prévision des caractéristiques ionosphériques normalisées sous incidence verticale

Il faut améliorer la représentation des caractéristiques ionosphériques. Cette question est étudiée en procédant, tant au sol qu'au moyen de satellites, à des mesures étayées par des théories appropriées. On espère obtenir ainsi des cartes plus précises de foF2 au-dessus des régions océaniques ainsi qu'aux latitudes élevées. La possibilité d'une représentation de l'ovale auroral pour différents niveaux d'activité magnétique semble mériter d'être prise en considération. Des améliorations de la représentation de foE aux latitudes élevées sont nécessaires, notamment en ce qui concerne la manière de tenir compte de l'ionisation induite par les particules aux latitudes aurorales.

4. Modèle de la distribution de la concentration électronique en fonction de la hauteur

Le modèle actuel se compose de trois segments: deux segments paraboliques, l'un dans la région E et l'autre dans la région F2, reliés par un segment rectiligne dans la région intermédiaire. La demi-épaisseur du segment de la région F2 est donnée par des relations empiriques en fonction de la caractéristique ionosphérique sous incidence verticale h'F,F2. Malheureusement, la représentation globale de cette caractéristique n'est pas aussi précise qu'on le voudrait par suite de certaines difficultés d'interprétation des données; de plus, les relations empiriques ne sont qu'approximatives, pour certaines combinaisons de valeurs des caractéristiques ionosphériques. On a consacré certains travaux à l'étude des avantages que présentent d'autres manières de déterminer la demi-épaisseur de la région F2 [Dudeney et Bradley, 1976], telles que l'emploi de représentations du rapport de cette demi-épaisseur à la hauteur où la concentration électronique est maximale [Lucas et Haydon, 1966] et le recours à des expressions faisant intervenir la hauteur d'échelle de la densité des particules neutres en fonction de la hauteur [Rush et Elkins, 1975]. Il faut poursuivre les travaux pour savoir quelle méthode est la meilleure. Avec le modèle actuel, il y a des discontinuités dans la hauteur virtuelle en cas de passage de la réflexion sur le segment rectiligne au segment parabolique de la couche F2. Un nouveau modèle a été mis au point [Dudeney, 1978] qui supprime cet inconvénient.

5. Modes de propagation et trajets des rayons; détermination de la fréquence maximale utilisable

On devrait poursuivre les études afin de savoir si le choix des modes pris en considération pour les différentes distances de propagation est bien le meilleur. Il convient de s'intéresser particulièrement au cas des modes mixtes qui impliquent des réflexions successives sur plus d'une couche de l'ionosphère. Il y a lieu de faire de nouvelles comparaisons des diverses procédures d'itération utilisées en vue d'obtenir les trajets de rayons entre des terminaux fixes selon la méthode du «ray-set» [Haydon, 1975]. La précision avec laquelle on prévoit l'inclinaison des couches ionosphériques demande à être vérifiée. Si l'on trouve que les prévisions en cette matière sont généralement raisonnables, on tiendra compte des modes de propagation par une couche inclinée, surtout aux latitudes élevées où les résultats donnés par la méthode de tracé des rayons révèlent leur extrême importance. Il convient d'introduire les équations existantes [Dick, 1976] pour tenir compte des modes de propagation par une couche inclinée sur les longs trajets où l'on atteint un périgée avec au moins deux réflexions sur l'ionosphère sans réflexion intermédiaire au sol [Hortenbach et Rogler, 1976]. L'importance de la propagation en dehors du plan du grand cercle a été mise en évidence dans une étude des variations saisonnières des directions en azimut du trajet des rayons [CCIR, 1974-78]. Il convient de procéder à de nouvelles recherches. On a mis au point [Kanaya et Wakai, 1976] une méthode qui tient compte des modes de propagation en dehors du grand cercle sur de longs trajets.

Des méthodes améliorées de détermination de la MUF de référence fondées sur le tracé des rayons ont été proposées par Huang [1977] et Lockwood [1983]. Il y a lieu de faire des comparaisons entre les estimations de la MUF de référence déduites de formules empiriques et celles qui proviennent du tracé des rayons, cela afin de voir si la première de ces deux méthodes est suffisamment précise. Pour les trajets de grande longueur, la validité de la méthode des deux points directeurs est encore très contestée; il faut donc s'intéresser à cette question. Enfin, on pense aujourd'hui que les variations d'un jour à l'autre de la MUF sont indépendantes de la distance de propagation ainsi que de l'ordre du mode de propagation; cette opinion demande à être confirmée.

6. Gain des antennes d'émission et de réception

Les formules qui donnent aujourd'hui la résistance de rayonnement d'une antenne [Barghausen et autres, 1969] sont valables pour le cas où celle-ci est située au-dessus d'un sol parfaitement conducteur; il convient de les étendre au cas d'un sol de conductivité finie et de constante diélectrique finie. La plupart des antennes sont prévues pour rayonner ou pour recevoir des ondes polarisées horizontalement ou verticalement le long du grand cercle qui joint l'émetteur au récepteur; cependant, dans les autres directions, comme celles qui interviennent dans les calculs de brouillage, les antennes ont à répondre à des ondes de polarisation elliptique. Afin de pouvoir calculer l'affaiblissement par couplage de polarisation, on a besoin d'expressions relatives à l'antenne qui incluent cette polarisation aussi bien que le gain de puissance.

7. Absorption ionosphérique

On a observé des différences systématiques, pouvant aller jusqu'à 6 dB, entre les estimations de l'absorption ionosphérique faites selon la deuxième méthode de prévision et celles déduites de mesures. Ces différences ont été relevées en République fédérale d'Allemagne [Rottger et Schwentek, 1974] sur un trajet de 300 km à la fréquence 2,6 MHz; elles demandent à être étudiées de plus près. Il convient de procéder à des essais afin de vérifier le degré de validité de la méthode d'estimation de l'absorption aurorale et de lui apporter des améliorations selon les besoins.

On a pu obtenir la variation de l'absorption pour un mode donné en faisant une analyse analogue à celle qui a permis d'estimer l'absorption sous incidence verticale, dans le modèle existant [George et Bradley, 1974]. Cette estimation de la variabilité de l'absorption a pu être ensuite utilisée pour améliorer l'estimation de la distribution de puissance du signal reçu.

8. Affaiblissement par couplage de polarisation

Il ressort d'études théoriques effectuées sur des trajets à bonds multiples que, dans certains cas, l'affaiblissement par couplage de polarisation dû à la modification des composantes magnéto-ioniques lors de la réflexion des ondes sur le sol, peut être très grand (10 dB ou davantage). On dispose d'une méthode plus complète pour tenir compte de cet affaiblissement [Tchernov, 1983].

9. Réflexion et diffusion par des irrégularités

Des progrès dans notre connaissance de la structure spatiale et de l'occurence dans le temps des irrégularités de la couche E sporadique, joints à une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la réflexion et de la diffusion des ondes [Sinno et autres, 1976], conduisent à penser qu'il sera sans doute bientôt possible de mieux tenir compte des pertes par réflexion et par occultation dues à la couche E sporadique. Le GTI 6/8 continue à étudier les expressions des pertes par réflexion. Des comparaisons des champs sur trajets obliques avec des ionogrammes sous incidence verticale enregistrés simultanément suggèrent que les pertes par réflexion et par diffusion sur Es peuvent varier selon les différentes catégories d'irrégularités de l'ionisation

sporadique et, par conséquent, peuvent dépendre de la latitude. Il faut étudier de plus près les manières de déterminer l'influence combinée des modes de propagation qui impliquent des réflexions dues aux irrégularités de la couche E sporadique et aux couches régulières de l'ionosphère, en tenant notamment compte des diverses probabilités d'occurence et des variations d'un jour à l'autre de l'amplitude. On devra continuer à étudier les effets des irrégularités de la région F sur les champs d'ondes ayant suivi un trajet oblique. Les méthodes en vigueur ne tiennent aucun compte du phénomène «F diffus».

10. Affaiblissement par étalement

Le modèle utilisé actuellement comprend un terme d'affaiblissement en espace libre en fonction de l'inverse du carré de la distance. Il convient d'étudier le calcul explicite de l'affaiblissement par étalement en incorporant un terme englobant l'affaiblissement en espace libre, l'affaiblissement dû à la défocalisation et le gain dû à la focalisation (distance de saut, à l'horizon et aux antipodes). Cela permettra de mieux représenter l'affaiblissement total sur le trajet. La formule nécessaire est connue, mais il faut y introduire, pour un mode donné, la dérivée de la portée au sol par rapport à l'angle de site.

11. Evanouissement des signaux

On sait que l'intensité des signaux transmis par l'ionosphère subit des fluctuations. Il y a des variations à court terme ainsi que des variations d'un jour à l'autre. Dans les méthodes actuellement utilisées, il est tenu compte de ces variations dans une évaluation de la compatibilité moyennant l'introduction de facteurs statistiquement appropriés. La variabilité à court terme est due à des modifications de l'absorption ionosphérique, à la focalisation, à la défocalisation et à la propagation par trajets multiples. La variabilité d'un jour à l'autre est due à la variabilité correspondante de l'ionisation des régions D, E et F. On sait maintenant qu'elle dépend de façon critique du rapport de la fréquence de l'onde à la MUF de référence [Bradley, 1983; CCIR, 1982-86a].

12. Propagation aux fréquences supérieures à la MUF de référence

Tant en République fédérale d'Allemagne [Damboldt, 1976] qu'au Japon [Kanaya et Wakai, 1976], on a entrepris des travaux dont on espère qu'ils aboutiront à des méthodes plus précises d'évaluation du champ à des fréquences supérieures à la MUF de référence. Il convient de déterminer l'importance relative des modes de propagation impliquant la réflexion sur les courbes régulières, la réflexion sur des irrégularités de l'ionisation sporadique et la diffusion latérale. Certaines données expérimentales [Dieminger et Rose, 1961] indiquent que le taux de décroissance du champ en fonction de l'augmentation de la fréquence dépend de la longueur du trajet et du fait que l'ionosphère est perturbée ou ne l'est pas. Une étude théorique du champ aux fréquences supérieures à la MUF près du bord de la première zone de silence a été faite en URSS [Tchernov et Jiltsov, 1982 et 1983]. Cette étude présente le champ en fonction de la fréquence et de la longueur du trajet compte tenu du caractère diffus de la région ionosphérique réfléchissante. Au niveau d'affaiblissement de 20 dB, la zone illuminée peut être plus proche de plusieurs centaines de kilomètres de l'émetteur que de la frontière géométrique. Or, on ne tient habituellement aucun compte de ces phénomènes.

Une analyse des données de mesures du champ dont dispose la banque de données C du CCIR montre que, pour les trajets d'une longueur égale ou inférieure à 2000 km, l'affaiblissement aux fréquences supérieures à la MUF est bien moindre que pour des trajets plus longs et qu'il n'augmente que lentement avec le rapport de la fréquence de l'onde à la MUF [CCIR, 1982-86b].

La deuxième méthode provisoire conduit à des valeurs maximales du champ pour la MUF de référence; cependant, les valeurs médianes mensuelles du champ déduites des mesures passent par un maximum pour une fréquence légèrement inférieure, pour laquelle des signaux réfléchis sur les couches régulières sont présents pendant un plus grand pourcentage des jours. Il convient d'améliorer les principes sur lesquels sont fondées les prévisions de manière à tenir compte de la corrélation entre les valeurs journalières de la MUF de référence et celles du champ. On admet que les variations du champ d'un jour à l'autre sont les mêmes, que la fréquence soit située au-dessous et au-dessus de la MUF de référence. Il faut donc examiner cette question et déterminer des marges destinées à en tenir compte de façon pertinente.

13. Probabilité de propagation par trajets multiples

On considère qu'il y a propagation par trajets multiples lorsque deux modes de propagation, ou davantage, accompagnés d'une différence de temps de propagation supérieure à une valeur donnée, donnent lieu, à la réception, à des puissances qui diffèrent entre elles de moins d'une valeur également donnée. Pour déterminer la probabilité d'une propagation par trajets multiples, on part d'estimations des variations d'un jour à l'autre du champ des différents modes, en supposant que chacun d'eux a une probabilité d'occurence égale à celle du mode qui a la probabilité d'occurence la plus grande. Il y a lieu de mettre au point une procédure qui tienne compte des probabilités d'occurence de chacun des différents modes.

14. Prévisions pour trajets de grande longueur

Il semble qu'il y ait lieu d'améliorer la précision des prévisions lorsqu'il s'agit de trajets d'une longueur supérieure à 10 000 km environ. Il convient d'examiner dans quelle mesure les modes de propagation peuvent être prévus de manière convenable pour ces distances. Des résultats d'observations [Hortenbach, 1977; Hortenbach et Rogler, 1976] indiquent que l'on peut obtenir des prévisions qui correspondent aux observations en tenant compte des modes de propagation par une couche inclinée et d'un gain de focalisation. En outre, il faut envisager une méthode d'approche différente reposant sur des formules empiriques simples, qui fasse connaître l'influence de la distance indépendamment des modes de propagation auxquels on l'applique. Une méthode adiabatique mise au point en URSS permet de calculer les trajets sur de longues distances, qui tient compte de la méthode du guide d'onde pour la transmission des ondes radioélectriques [Gourevitch et Tsedilina, 1983, 1985].

15. Estimation du rapport signal/bruit et de la fiabilité du circuit

La valeur pratique des prévisions serait améliorée si le programme d'ordinateur comportait des estimations des bruits atmosphériques et des bruits artificiels (voir à ce sujet respectivement les Rapports 322 et 258) et s'il fournissait des valeurs du rapport signal/bruit et de la fiabilité du circuit, c'est-à-dire de la probabilité pour qu'une valeur donnée du rapport signal/bruit soit obtenue ou dépassée.

Le Rapport 892 décrit plusieurs méthodes pour le calcul de la fiabilité des circuits à ondes décamétriques. Il est nécessaire de vérifier la précision des méthodes appliquées actuellement dans les calculs de fiabilité. En particulier, on pourrait être amené à améliorer les méthodes d'estimation de la fiabilité des circuits sur un trajet où existent plusieurs modes de propagation. On doit de plus envisager d'étendre la définition de la fiabilité afin d'y inclure la dispersion (due à la propagation par trajets multiples et à l'effet Doppler), la couverture du service et les variabilités dans le temps et dans l'espace [Bradley, 1983].

16. Extension à la gamme 1,5 à 2 MHz

La méthode de prévision doit être étendue de manière qu'on puisse l'appliquer dans la gamme 1,5 à 2 MHz. Elle devrait en particulier donner, entre les fréquences 1,5 et 1,6 MHz, des résultats qui cadrent avec ceux de l'Annexe I à la Recommandation 435.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W., PROCTOR, L. L. et SCHULTZ, L. D. [1969] Predicting long-term operational parameters of high-frequency sky-wave telecommunication systems. ESSA Tech. Rept. ERL 110-ITS78, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

BRADLEY, P. A. [1983] Signal and noise variability in high frequency sky-wave radio-service planning. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 10-1 à 10-13. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

DAMBOLDT, T. [1976] A comparison between the Deutsche Bundespost ionospheric HF radio propagation predictions and measured field strengths, dans *Radio Systems and the Ionosphere.* Ed. W. T. Blackband, 12-1, AGARD Conference Proceedings 173, Technical Editing and Reproduction Ltd., Londres, Royaume-Uni.

DICK, M. I. [1976] Raypath determination with perigee condition. GTI 6/1, Doc. 36.

DIEMINGER, W. et ROSE, G. [1961] Zum Feldstärkenverlauf am Rande der toten Zone (Variation du champ au voisinage du bord de la zone de silence). *NTZ*, **14**, 492-495.

DUDENEY, J. R. [1978] An improved model of the variation of electron concentration with height in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 195-203.

DUDENEY, J. R. et BRADLEY, P. A. [1976] Determination of F2-layer semi-thickness. GTI 6/1, Doc. 37.

GEORGE, P. L. et BRADLEY, P. A. [1974] Une nouvelle méthode pour la prévision de l'absorption ionosphérique des ondes décamétriques sous incidence oblique, *J. des Télécomm.*, Vol. 41, 307-312.

GOUREVITCH, A. V. et TSEDILINA, E. E. [1983] Amplituda elektricheskogo polia korotkih radiovoln v gorizontalno-neodnorodnoi ionosfere na mnogoskachkovih trassah (Amplitude of electric field of short radiowaves in a horizontally-irregular ionosphere on many-leap lines). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. XXIII, 764-767.

GOUREVITCH, A. V. et TSEDILINA, E. E. [1985] *Long-distance Propagation of HF Radio Waves.* Springer, Heidelberg, République fédérale d'Allemagne.

HAYDON, G. W. [1975] Rayset model for oblique propagation. GTI 6/1, Doc. 16.

HORTENBACH, K. J. [1977] Einfache Korrekturformel zur Berücksichtigung der Fokussierung im Antipodenbereich bei ionosphärischen Vorhersage Verfahren (Formule simplifiée de correction tenant compte de la focalisation aux antipodes pour la prévision du comportement de l'onde ionosphérique). *Rundfunktechn. Mitt.*, Vol. 21, **4**, 169-171.

HORTENBACH, K. J. et ROGLER, F. [1976] Die Ausbreitung von Kurzwellen-Rundfunksendungen auf transantipodalen Strecken und ihre Vorhersage (Propagation d'émissions de radiodiffusion en ondes décamétriques sur des trajets passant par les antipodes et prévision de ceux-ci). *Kleinheubacher Berichte*, **20**, 205-215.

HUANG HSUEH-CHING [1977] On the determination of the MUF for the propagation, GTI 6/1, Doc. 75.

KANAYA, S. et WAKAI, N. [1976] Method for estimating the signal strength of ground-scatter modes at frequencies above the classical MUF for transmitter-receiver separations beyond 4000 km. GTI 6/1. Doc. 39.

LOCKWOOD, M. [1983] A simple M-factor algorithm for improved estimation of the basic maximum usable frequency of radic waves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 130F, 296-302.

LUCAS, D. L. et HAYDON, G. W. [1966] Predicting statistical performance indexes for high frequency ionospheric telecommunication systems. ESSA Tech. Rep. IER1-ITSA1, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction. Report UAG-23, World Data Center for solar-terrestrial physics, NOAA, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique.

ROTTGER, J. et SCHWENTEK, H. [1974] A numerical description of the winter anomaly in ionospheric absorption for a sunspot cycle. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 36, 363-366.

RUSH, C. M. et ELKINS, T. J. [1975] Evaluation de l'absorption affectant les ondes décamétriques dans la région F au moyen de modèles réalistes de la densité électronique et de la fréquence de collision. *J. des Télécomm.*, Vol. **42 VIII**, 476-488.

SINNO, K., KAN, M. et HIRUKAWA, Y. [1976] On the reflection and transmission losses for ionospheric radio wave propagation via sporadio E. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **23(110)**, 65-84.

TCHERNOV, Y. A. [1983] Energetitchesky rastchet korotkovolnovykh radiolinii (Evaluation de l'équilibre d'énergie des liaisons radioélectriques en ondes décamétriques). *NIIR Proc.*, **4**, 5-12.

TCHERNOV, Y. A. et JILTSOV, A. O. [1982] O kaustikakh na korotkovolnovykh odnoskachkovykh radioliniyakh (Des caractéristiques du champ sur les liaisons radioélectriques à ondes décamétriques à un seul bond). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 22, **3**, 508.

TCHERNOV, Y. A. et JILTSOV, A. O. [1983] Statistitcheskie kharacteristiki napryajennosty polya KV v oblasty granitsy mertvoi zony (Données statistiques sur le champ en ondes décamétriques près de la frontière d'une zone de silence), 117. Recueil de documents de IZMIRAN, Acad. des Sciences de l'URSS, Moscou.

Documents du CCIR

[1974-78]: 6/240 (Allemagne (République fédérale d')).

[1982-86]: **a.** 6/54 (Allemagne (République fédérale d')); **b.** 6/209 (Allemagne (République fédérale d')).

RAPPORT 1013*

MÉTHODES FONDÉES SUR L'UTILISATION DE MICRO-ORDINATEURS POUR L'ÉVALUATION DES CONDITIONS DE LA PROPAGATION DES ONDES DÉCAMÉTRIQUES ET DE LA QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS

(Question 30/6, Programme d'études 30C/6)

(1986)

1. Introduction

Des modèles de propagation radioélectrique des ondes décamétriques et de la qualité de fonctionnement des circuits sont nécessaires pour la planification du service radioélectrique et pour la conception et la gestion de liaisons radioélectriques spécifiques. Jusqu'ici, ces besoins ont été satisfaits par des méthodes de prévision, appliquées au moyen de gros ordinateurs. Cependant, compte tenu de la disponibilité de micro-ordinateurs relativement peu coûteux, il est désormais possible de les utiliser pour ce type de travail. Le § 2 examine les avantages et les inconvénients des prévisions effectuées par micro-ordinateur. Le § 3 résume les différents besoins concernant l'établissement de prévisions au moyen de micro-ordinateurs. Une synthèse des méthodes disponibles est présentée dans le § 4.

2. Avantages et inconvénients de l'utilisation d'un micro-ordinateur

Un micro-ordinateur présente l'avantage de constituer un système portatif ou portable relativement bon marché, capable de fournir des résultats chaque fois et aussi souvent que cela est nécessaire. Il présente comme inconvénients que la configuration de base ne possède pas toujours la capacité désirée de stockage de données et que les calculs et l'impression des résultats peuvent être moins précis et moins rapides qu'avec un gros ordinateur. S'agissant de la mise en œuvre d'une procédure technique donnée, dans le cadre d'un système de prévision par micro-ordinateur, il faut veiller à ce que les limitations du matériel ou de la programmation n'entraînent pas une réduction quelconque de sa précision.

---

* Ce Rapport est porté à l'attention des Commissions d'études 1, 3, 8 et 10.

3. Besoins en matière de prévisions par micro-ordinateur

Sans aucun doute, le personnel chargé de la planification et de l'exploitation de services radioélectriques dans certaines organisations considère le recours aux micro-ordinateurs comme une variante de l'utilisation de gros ordinateurs. Il espère qu'ils pourront lui apporter, en matière de calculs, tous les avantages des gros ordinateurs, mais à moindre coût, avec une précision comparable des résultats; en outre, l'installation sera placée sous leur seul contrôle et, de ce fait, elle présentera l'avantage d'être immédiatemment disponible. Les développements dans le domaine des micro-ordinateurs sont très rapides et, dans quelques années, il est fort probable que ces besoins pourront être satisfaits. A l'heure actuelle, cependant, des approximations dans les procédures informatiques devront probablement être introduites en raison des limitations du système et des temps de calcul excessifs comparés à ceux des gros ordinateurs.

La facilité relative avec laquelle les prévisions peuvent être effectuées au moyen des micro-ordinateurs les rend bien adaptés au calcul approximatif des caractéristiques de propagation à long terme. Celles-ci sont très utiles pour préparer l'évaluation par un gros ordinateur des cas qui méritent un traitement plus précis. Dans cette catégorie par exemple, les prévisions par micro-ordinateur pourraient être utiles pour les délégués des conférences de planification qui ne sont concernés que par un petit sous-ensemble de cas traités à la conférence. Plusieurs procédures existantes de prévision au moyen de micro-ordinateurs ont été structurées pour répondre aux besoins de la communauté des radioamateurs.

Les techniques disponibles pour les prévisions à court terme ont une précision très limitée; en outre, la plupart des développements s'y rapportant sont maintenant appliqués dans le domaine des techniques d'estimation en temps réel des canaux, pour l'optimisation des systèmes (voir le Rapport 889). Dans ces circonstances, les prévisions par micro-ordinateur, qui visent à déterminer, par exemple, quels sont parmi un petit nombre de paramètres pré-spécifiés, comme la fréquence d'émission, ceux à adopter, devraient offrir une précision adéquate. Elles présentent également des avantages évidents lors des calculs effectués aux extrémités des circuits. Au cours des quelques années à venir, il est probable que l'on assistera à des développements importants, en particulier de la part des constructeurs d'équipements radioélectriques, dans l'association de calculs par micro-ordinateurs avec des systèmes de sondage en temps réel [Clarke, 1985].

Les prévisions par micro-ordinateur offrent des avantages évidents dans le cas des systèmes mobiles, que ce soit sur terre, sur mer ou dans l'air, car de nouvelles liaisons seront probablement mises en œuvre dans des régions où le personnel d'exploitation ne possédera aucune expérience préalable concernant les conditions de propagation. Le degré nécessaire de portabilité ou de transportabilité dépendra de la plate-forme disponible.

Avant de pouvoir procéder au développement de prévisions par micro-ordinateurs, il faudra définir:

- les paramètres à calculer,
- les procédures techniques à utiliser, et
- un micro-ordinateur adéquat.

Il peut exister différents impératifs en ce qui concerne les ressources informatiques (en matière de coût, de taille, de vitesse, de stockage de données) et la précision, selon l'application et l'utilisateur. Dans toute mise au point d'un système, la précision doit être prioritaire. Pour ce qui est de l'UIT, il ne semble pas qu'elle doive essayer de normaliser le choix d'un micro-ordinateur, mais il existe des avantages particuliers à chercher à promouvoir le développement du logiciel pour un micro-ordinateur approprié, en définissant une spécification normalisée des paramètres à calculer et des méthodes de calcul. L'Annexe I donne les spécifications applicables aux systèmes de micro-ordinateur. Tout système de ce genre doit faire appel à des procédures techniques ayant une précision suffisante pour l'application proposée.

4. Procédures disponibles pour la prévision au moyen d'un micro-ordinateur

Bien qu'il existe un grand nombre de procédures de prévision de la propagation pour une évaluation par de gros et de mini-ordinateurs, il y en a beaucoup moins actuellement qui soient destinées à des micro-ordinateurs. Celles qui sont disponibles sont à capacité limitée car basées sur des représentations simplifiées de l'ionosphère.

Certains groupes intéressés par des zones géographiques restreintes ou des périodes limitées ont enregistré sous forme de tableaux de données ionosphériques provenant des cartes CCIR des caractéristiques ionosphériques [Turner, 1985]. Cependant, Banks et autres [1983] ont conclu que, pour des applications au niveau mondial, la méthode faisant appel à des coefficients numériques est plus efficace du point de vue du temps de calcul que la procédure grille-point.

Un modèle ionosphérique empirique simplifié peut servir de base aux prévisions par micro-ordinateur [Rose, 1982]. Parmi les améliorations apportées à ce modèle, on peut citer les travaux de Devereux et Wilkinson [1983] et Gerdes [1984]. Un autre modèle ionosphérique simplifié mis au point par Fricker [1981] est employé par Bakhuizen [1984]. D'autres programmes destinés à être traités par des calculatrices de poche qui permettent l'entrée des données ionosphériques nécessaires sont ceux de Hortenbach et Scholz [1982] et de Dominici [1983]. A noter qu'une adaptation de la procédure de la CAMR HFBC aux micro-ordinateurs a été effectuée par Pan et Ji [1985]. Petrie et autres [1986] ont élaboré un programme destiné à un micro-ordinateur qui fournit la fréquence optimale d'utilisation (FOT) et la fréquence minimale utilisable (LUF) pour un circuit à ondes décamétriques. Ce programme est fondé sur la procédure exposée dans le Rapport 894 et utilise un sous-ensemble du modèle ionosphérique décrit dans le Rapport 340.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKHUIZEN, H. [17 juin 1984] Program MICROMUF. Radiodiffusé par Radio Nederland, Pays-Bas.

BANKS, P. H. T., MILLER, B. H., DICK, M. I. et BRADLEY, P. A. [1983] Storage of the CCIR reference maps of ionospheric characteristics for microcomputer evaluation. GTI 6/1, Doc. 244.

CLARKE, E. T. [1985] Real time frequency management in an embedded microcomputer. IEE Conf. Publ. No. 245, 23-25.

DEVEREUX, E. L. et WILKINSON, D. [1983] HF predictions on the home computer. *Radio Comm.*, Vol. 59, **3**, 246-248.

DOMINICI, P. [1983] A simplified prediction method for the calculation of the maximum usable frequency and the median sky-wave field strenght using pocket calculators. GTI 6/1, Doc. 235.

FRICKER, R. [1981] Formulae for the critical frequency of the F2 layer. GTI 6/12, Doc. 23.

GERDES, N. St. C. [1984] A low-cost prediction service for mobile and portable radio using ionospheric propagation. IEE Conf. Publ. No. 238, 209-211.

HORTENBACH, K. J. et SCHOLZ, H. [1982] Berechnung der Raumwellenfeldstärke und der höchsten übertragbaren Frequenz im HF-Bereich mit Hilfe eines programmierbaren Taschenrechners (HP 97) (Calcul du champ et de la MUF à l'aide d'une calculatrice de poche programmable (HP 97)). *Rundfunktechn. Mitt.*, Vol. 26, **2**, 52-62. (Disponible en anglais dans le Doc. 124, GTI 6/1.)

PAN, Z. et JI, P. [1985] HF field strength measurements in China and their comparisons with predicted values. GTI 6/1, Doc. 253.

PETRIE, L. E., GOUDRIE, G. W., ROSS, D. B., TIMLECK, P. L. et CHOW, S. M. [1986] MICROPREDIC – An HF prediction program for 8086/8088-based computers, Communications Research Centre Report 1390. Dept. of Communications, Ottawa, Ontario, Canada.

ROSE, R. B. [décembre 1982] MINIMUF: a simplified MUF-prediction program for microcomputers. *QST*, Vol. LXVI, **12**, 36-38.

TURNER, J. F. [1985] A grid-point system for prediction data. Tech. Rep. TR-85-08, Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

ANNEXE I

SPÉCIFICATIONS POUR DES SYSTÈMES DE PRÉVISION PAR MICRO-ORDINATEUR

1. Paramètres à calculer

- MUF de référence, MUF d'exploitation, FOT, LUF;
- modes disponibles, angles de site et valeur médiane du champ du signal, valeur médiane de l'intensité du bruit, à la MUF et pour des fréquences d'entrée sélectionnées.

2. Présentation des résultats

- sous forme de tableau (pour les heures requises) pour un mois et pour un circuit déterminé,
- sous forme graphique pour un mois et pour un circuit déterminé,
- résultats disponibles:
  - valeur médiane mensuelle de la MUF, la FOT et la LUF,
  - valeur médiane mensuelle de l'amplitude du signal et rapport signal/bruit pour des fréquences sélectionnées,
  - heures auxquelles une valeur médiane d'un rapport signal/bruit spécifié est atteinte.

3. Paramètres d'entrée

- emplacement des extrémités du circuit;
- mois et activité solaire;
- puissance de l'émetteur;
- gain des antennes d'émission et de réception (valeurs tabulaires pour différents angles de site et différentes fréquences à l'azimut requis);
- catégorie du milieu correspondant au bruit artificiel (Rapport 258);
- valeurs du bruit au site choisi par l'utilisateur;
- largeur de bande du récepteur;
- rapport signal/bruit requis.

Note 1. – Les procédures techniques suivantes peuvent être appliquées:

a) *Modèle ionosphérique*
- Rapport 340.

b) *Modes de trajet*
- modes considérés, hauteur de réflexion spéculaire (Rapport 894).

c) *Intensité du signal*
- affaiblissement spatial, affaiblissement à la réflexion au sol, absorption normale et aurorale (Rapport 894);
- surcroît d'affaiblissement du système (Rapport 894);
- trajets de longueur supérieure à 9000 km (Rapport 894).

d) *Intensité de bruit*
- bruit atmosphérique (Rapport 322);
- bruit artificiel (Rapport 258).

Note 2. – L'ordre de priorité des différents impératifs doit être le suivant:
- précision
- temps de calcul
- taille de la mémoire.

RECOMMANDATION 534-2

MÉTHODE DE CALCUL DU CHAMP EN PRÉSENCE D'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E

(Programme d'études 30B/6)

(1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la propagation par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la région E constitue une source importante de brouillage dans la partie inférieure de la gamme des ondes métriques;

b) que la méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E jointe en Annexe I à la présente Recommandation s'est révélée applicable et fiable;

c) qu'il n'existe pas d'autre méthode pratique,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. qu'il convient d'adopter la méthode de calcul décrite dans l'Annexe I pour évaluer aux latitudes géomagnétiques basses et moyennes le champ en présence d'ionisation sporadique de la région E;

2. qu'il convient de recueillir des données supplémentaires sur foEs et sur le champ en présence d'ionisation sporadique de la région E, notamment en ce qui concerne les zones aurorales. Entre temps, il convient d'être prudent si on utilise dans ces régions la méthode décrite à l'Annexe I.

ANNEXE I

MÉTHODE DE CALCUL DU CHAMP EN PRÉSENCE D'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E

1. Introduction

On trouvera ci-après la description d'une méthode de calcul statistique du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E (Es), dans les bandes d'ondes métriques et éventuellement dans la partie supérieure des bandes décamétriques, jusqu'à une distance de 4000 km. Cette méthode est fondée sur le fait que le champ présente une corrélation très étroite avec foES, fréquence critique de la couche E sporadique sous incidence verticale, au point milieu du trajet. Il convient de noter que la méthode s'applique bien à un circuit radioélectrique ionosphérique dans le cas où le mode de propagation normal par la couche E ou F2 n'existe pas. Lorsqu'on emploie la méthode dans les bandes d'ondes décamétriques, il faut donc faire preuve de prudence s'il existe une possibilité de propagation par la couche normale (pour la propagation par la couche normale, voir la Recommandation 533). Cette méthode est, pour l'essentiel, identique à celle qui a été décrite par Miya et Sasaki [1966] et par Miya et autres [1978]; elle a été perfectionnée sur la base de résultats de mesure obtenus par l'UER pendant 10 ans pour modifier la courbe de l'affaiblissement ionosphérique [UER, 1976]; on a utilisé également un certain nombre de graphiques de foEs fournis par des membres du GTI 6/8. Les données fournies par la présente Recommandation concernent les latitudes géomagnétiques comprises entre ± 60°; il faut, par conséquent, continuer à étudier dans quelle mesure la méthode s'applique dans les zones aurorales.

Les résultats obtenus lors d'expériences réalisées par l'URSS sur 9, 14, 24 et 44 MHz pour un trajet de 1050 km [CCIR, 1978-82] et par la République Argentine sur 47,620 MHz sur un trajet de 1070 km, témoignent d'une concordance satisfaisante avec cette méthode de prévision [Giraldez, 1984] pour, dans les deux cas, des régions de latitude magnétique moyenne.

Dans la région équatoriale, des résultats expérimentaux de propagation à moyenne distance (500 à 2000 km) indiquent très clairement une propagation par Es, que l'on doit distinguer des effets nettement plus importants de la propagation transéquatoriale dans la région (voir le Rapport 259). Le champ de propagation par Es à basse latitude est à peu près identique à celui fourni par les évaluations pour les latitudes moyennes figurant dans la présente Annexe. Toutefois, la différence la plus importante concerne le pourcentage de temps en fonction de la fréquence critique à incidence verticale (foEs) (voir les Fig. 2 à 6 pour les latitudes magnétiques moyennes). En conséquence, on utilisera les nouvelles Fig. 16 à 21 pour les régions de basse latitude magnétique.

La méthode présente les caractéristiques suivantes:

- on fait la prévision du champ Es en établissant une correspondance statistique entre une valeur de l'affaiblissement ionosphérique et la valeur de foEs correspondant à un taux d'occurrence donné;
- l'affaiblissement ionosphérique du signal Es est représenté par une fonction du rapport de la fréquence du signal, f, à foEs et de la distance à la surface de la Terre entre les stations d'émission et de réception;
- on se sert de graphiques de probabilité et de cartes mondiales de foEs pour accélérer et faciliter l'évaluation du champ Es.

2. Formule pour le champ en présence d'E sporadique

On peut exprimer le champ en présence de *Es* par la formule suivante:

$$E = E_0 + P + G_t - L_t - \Gamma \quad \text{dB} \tag{1}$$

$$E_0 = 105 - 20 \log l \quad \text{dB} \tag{2}$$

où

E: champ prévu (dB(μV/m));

E_0: champ théorique en fonction inverse de la distance (dB(μV/m)), pour une puissance rayonnée de 1 kW et pour une antenne d'émission isotrope;

P: puissance de l'émetteur (dB(1 kW));

G_t: gain d'antenne d'émission par rapport à une antenne isotrope (dB);

L_t: perte dans l'antenne d'émission (dB);

Γ: affaiblissement ionosphérique (dB) représenté par les courbes pleines de la Fig. 1;

l: longueur du trajet de transmission (km) (voir la formule (5)).

Pour le calcul par ordinateur, l'affaiblissement d'un signal s'étant propagé par un seul bond, $\Gamma_{(1\ \text{bond})}(d)$, est donné approximativement par:

$$\Gamma_{(1\ \text{bond})}(d) = \left\{ \frac{40}{1+\left(\frac{d}{130}\right)+\left(\frac{d}{250}\right)^2} + 0{,}2\left(\frac{d}{2600}\right)^2 \right\} \left(\frac{f}{\text{foEs}}\right)^2 + \exp\left(\frac{d-1660}{280}\right) \quad (3)$$

et Γ pour un signal s'étant propagé par deux bonds, $\Gamma_{(2\ \text{bonds})}(d)$, approximativement par:

$$\Gamma_{(2\ \text{bonds})}(d) = 2{,}6\ \Gamma_{(1\ \text{bond})}\left(\frac{d}{2}\right) \quad (4)$$

et

l: longueur du trajet de transmission (km)

$$l = (d^2 + 4\ h^2)^{1/2} \quad (5)$$

où

h: hauteur de la couche Es (km);

d: distance à la surface de la Terre entre les stations d'émission et de réception (km);

f: fréquence du signal (MHz);

foEs : fréquence critique de l'ionisation sporadique de la région E sous incidence verticale, pour un taux d'occurrence donné (MHz).

La précision avec laquelle les formules (3) et (4) reproduisent les valeurs mesurées de Γ est indiquée à la Fig. 1 (courbes en pointillés). Il convient de limiter l'emploi de la formule (3) aux distances inférieures à 2600 km et à des valeurs de f/foEs comprises entre 1 et 8; l'erreur sera alors inférieure à 5 dB. Il convient de limiter l'emploi de la formule (4) aux distances comprises entre 2600 et 4000 km et à des valeurs de f/foEs comprises entre 2 et 5,5; l'erreur sera alors inférieure à 10 dB.

3. Méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E

Le champ Es est calculé en effectuant les opérations successives suivantes:

- calculer la valeur de E_0 correspondant à une valeur indiquée de l en utilisant la formule (2);
- (latitude d'inclinaison du point milieu en dehors de $\pm$ 20°): lire la valeur de foEs pour un pourcentage donné de temps d'apparition dans la région et pour la saison désirées, en utilisant une des Fig. 2 à 6. Pour une prévision plus précise, lire la valeur du pourcentage de temps où foEs dépasse 7 MHz au point milieu du trajet, en utilisant la carte voulue parmi celle des Fig. 12 à 15, et déterminer la valeur de foEs en traçant une nouvelle droite sur celle des Fig. 2 à 6 qui convient, ainsi que cela est indiqué au § 4.1. Pour une prévision des variations diurnes, lire la valeur de foEs sur celle des Fig. 7 à 11 qui convient;
- (latitude d'inclinaison du point milieu comprise entre $\pm$ 20°): déterminer l'inclinaison magnétique au point de réflexion ionosphérique et lire sur les Fig. 16 à 21, la valeur de foEs pour un pourcentage donné de temps d'apparition dans la région et pour la saison désirées;
- calculer f/foEs ;
- en utilisant les courbes en trait plein de la Fig. 1, lire la valeur de Γ correspondant à la valeur donnée de d et à la valeur calculée de f/foEs ou, si l'on cherche une valeur approchée, calculer Γ au moyen des formules (3) et (4);
- calculer la valeur estimée de E en appliquant la formule (1), en se servant des valeurs données de P, G_t, et L_t, et de la valeur obtenue pour Γ.

4. Probabilité d'occurrence de foEs

Il faut spécifier les caractéristiques statistiques de foEs, étant donné que cette grandeur a un comportement sporadique en fonction des emplacements et du temps. Pour les prévisions très exactes, on peut se servir d'une carte mondiale de foEs comme celle qui figure dans la Partie 5 du Rapport 340. En revanche, on peut se contenter de données statistiques simplifiées sur foEs si l'on se borne à rechercher la tendance générale de la variation temporelle.

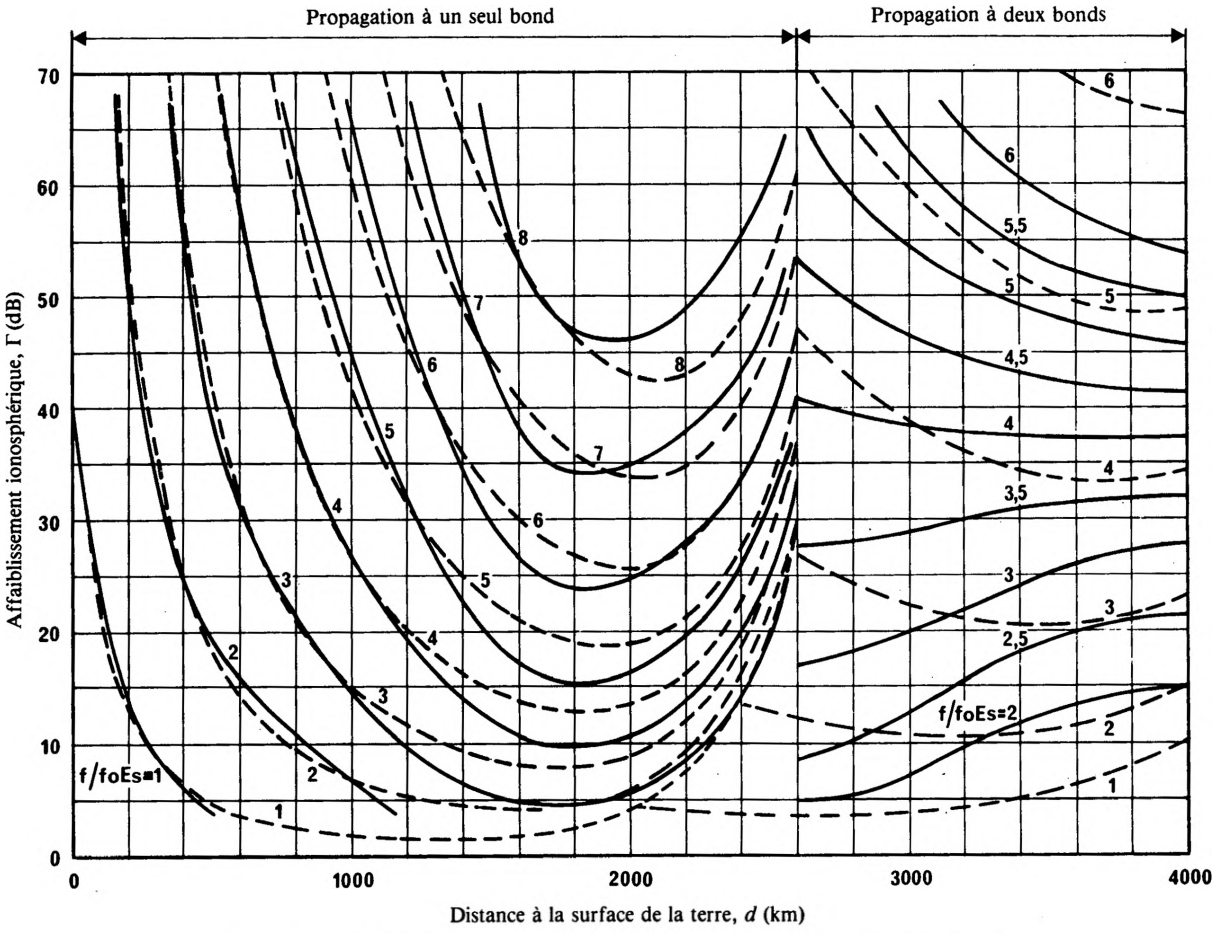


FIGURE 1 – *Courbes de l'affaiblissement ionosphérique, Γ, pour la propagation par Es*

——— d'après les valeurs observées,

– – – – d'après les formules empiriques (3) et (4)

Pour la prévision du champ moyen en présence de Es, on trace des courbes de probabilité de foEs pour cinq régions de latitude moyenne: Europe et Afrique du Nord, Amérique du Nord, Asie (Extrême-Orient), Amérique du Sud et une région intermédiaire entre ces régions (voir les Fig. 2 à 11). Aux basses latitudes, les Fig. 16 à 21 présentent les courbes de probabilité de foEs pour l'Amérique, l'Asie et l'Afrique. Les caractéristiques de la zone aurorale devront être précisées ultérieurement.

4.1 *Latitudes moyennes*

Pour obtenir des caractéristiques géographiques précises de foEs, on se sert de cartes mondiales du pourcentage de temps pour lequel foEs est égal ou supérieur à 7 MHz pendant les mois de mai à août (été dans l'hémisphère nord), novembre à février (été dans l'hémisphère sud), mars, avril, septembre et octobre (mois d'équinoxe, nord et sud) et pour douze mois (ces cartes sont données dans les Fig. 12 à 15 [Smith, 1976, 1978]). Sur ces cartes sont tracées les courbes du pourcentage de temps entre les latitudes géomagnétiques (ou dipolaires) de 60 °N et 60 °S. En outre, une région de basse latitude autour de l'équateur d'inclinaison magnétique est exclue.

Les Fig. 2 à 6 montrent la relation qui existe entre la valeur de foEs et le pourcentage de temps d'occurrence. Dans ces figures, les courbes relatives aux mois d'été, aux mois d'hiver et aux mois d'équinoxe sont toutes des lignes droites reliant deux points qui correspondent aux pourcentages de temps pendant lesquels foEs dépasse respectivement 7 MHz et 10 MHz. Ces courbes obéissent à la loi de probabilités de Phillips qui a un caractère rigoureusement empirique convenant parfaitement aux latitudes moyennes pour des pourcentages de temps inférieurs à 30% environ et pour des fréquences supérieures à foE, fréquence critique de la couche normale E. Il convient d'utiliser la loi de Phillips avec prudence pour les fréquences supérieures à 100 MHz environ et pour les latitudes équatoriales et élevées. Cette loi s'exprime par:

$$\log p = a + bf \qquad (6)$$

où

p : probabilité foEs > f,

f : fréquence en MHz,

a et b : constantes ajustables, de telle sorte que b soit la pente dans une courbe log p en fonction de f.

Une courbe indiquant la moyenne annuelle donne, pour les faibles pourcentages de temps, des pourcentages de temps approximativement égaux aux tiers des pourcentages correspondants pour les mois d'été. A titre de comparaison, on a ajouté des courbes de probabilité relatives aux heures de jour (0800-2300 h) pour les mois d'été, époque où l'on observe l'intensité maximale de l'ionisation E sporadique.

Supposons que, dans une certaine région, il y a une différence entre un pourcentage de temps pour 7 MHz obtenu avec les cartes mondiales des Fig. 12, 13, 14 ou 15 et le pourcentage fourni par la courbe de probabilité moyenne des Fig. 2 à 6. On peut obtenir une valeur de foEs pour un pourcentage de temps donné en traçant une nouvelle courbe de probabilité parallèle à la courbe initiale pour la région considérée, et déplacée par rapport à cette courbe initiale d'une quantité égale à la différence constatée.

Les Fig. 7 à 11 montrent les variations diurnes de l'occurrence de foEs pour des tranches de 4 heures à l'intérieur des 4 régions définies plus haut, pour les mois d'été et les autres mois conformément à leurs propres caractéristiques. On voit que foEs accuse un minimum très net après midi, dans les régions B et C, surtout en été. Pour la prévision exacte du comportement de l'intensité des signaux Es, il faudra peut-être utiliser des tranches horaires plus étroites que quatre heures pour représenter les variations diurnes de foEs.

4.2 *Basses latitudes*

Les Fig. 16 à 21 montrent la relation entre la valeur de foEs et le pourcentage de temps d'apparition de foEs aux basses latitudes. Ces figures permettent de constater une différence très nette entre une ceinture très étroite autour de l'équateur d'inclinaison (angle d'inclinaison ± 6°) et la région adjacente avec une inclinaison allant jusqu'à ± 20°, ces deux régions pouvant être appelées respectivement région équatoriale et région sub-équatoriale. Comme on peut le constater en comparant les Fig. 2 à 6, seule la région sub-équatoriale (et non pas la région équatoriale) est sujette à la loi de probabilité de Phillips.

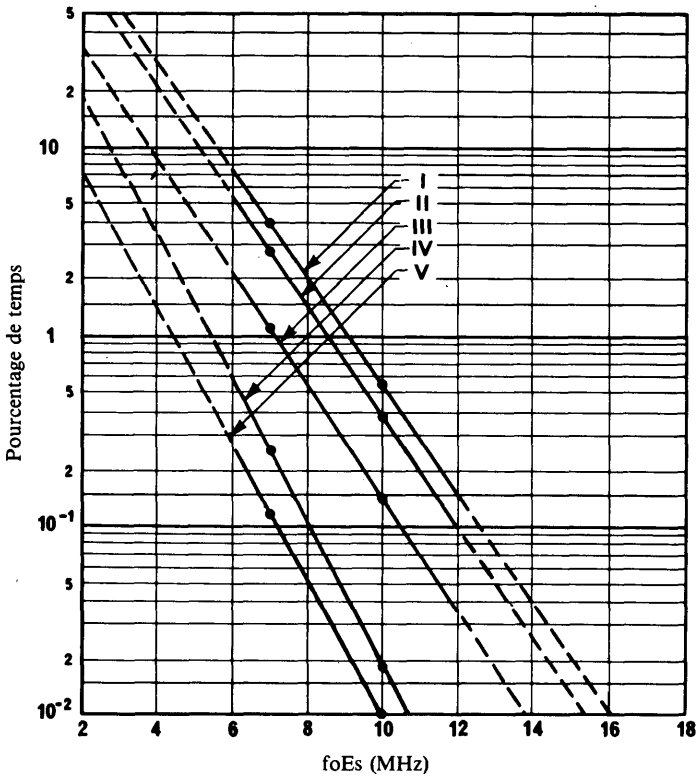


FIGURE 2 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région A*

Région A: Europe et Afrique du Nord
I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)
II: de mai à août
III: moyenne annuelle
IV: mars, avril, septembre et octobre
V: de novembre à février

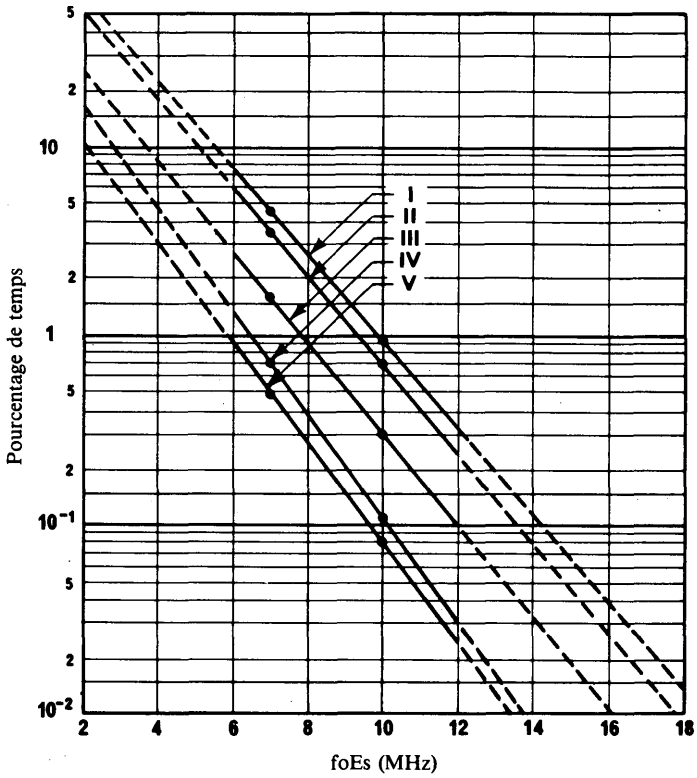


FIGURE 3 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région B*

Région B: Amérique du Nord
I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)
II: de mai à août
III: moyenne annuelle
IV: mars, avril, septembre et octobre
V: de novembre à février

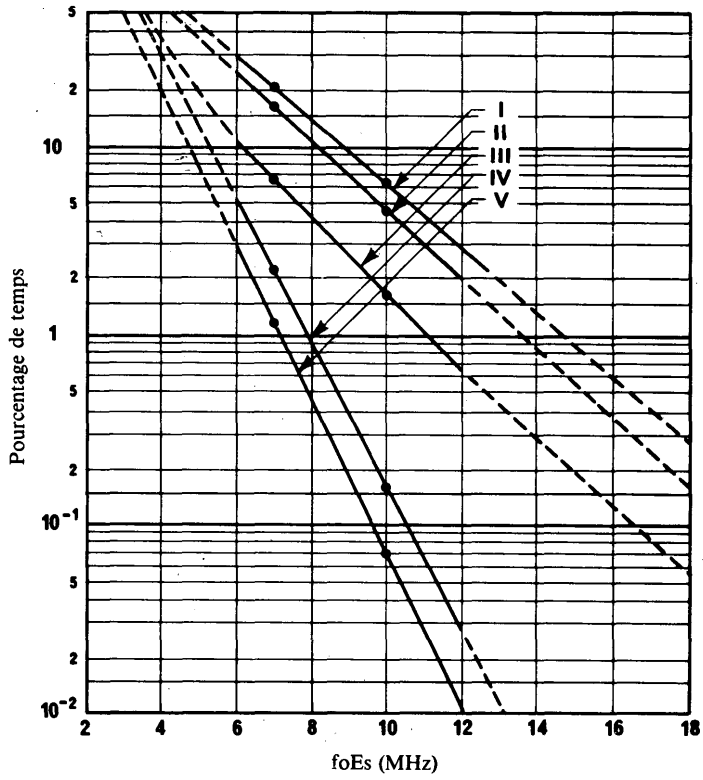


FIGURE 4 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région C*

Région C: Asie (Extrême-Orient)
I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)
II: de mai à août
III: moyenne annuelle
IV: mars, avril, septembre et octobre
V: de novembre à février

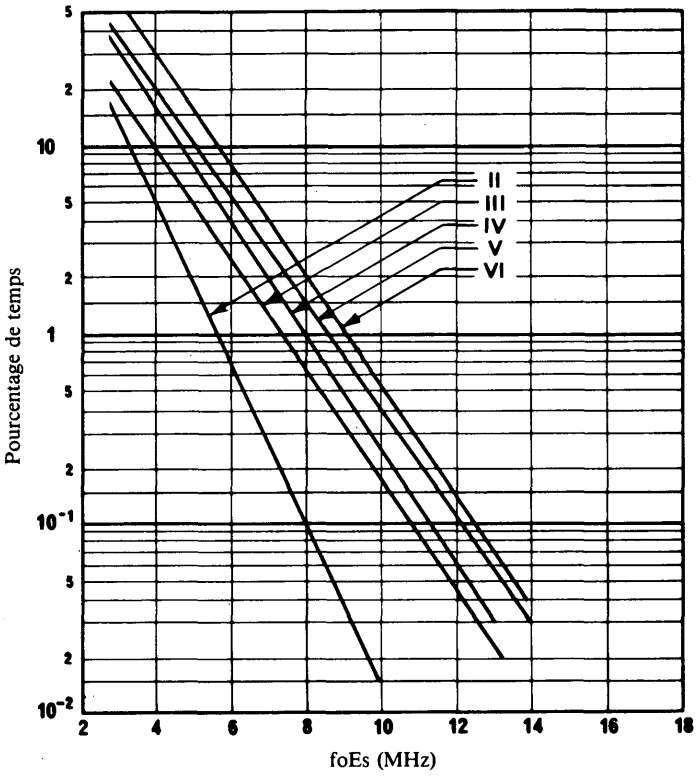


FIGURE 5 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région D*

Région D: Amérique du Sud
II: de mai à août
III: moyenne annuelle
IV: mars, avril, septembre et octobre
V: de novembre à février
VI: de novembre à février (08 h 00-23 h 00)

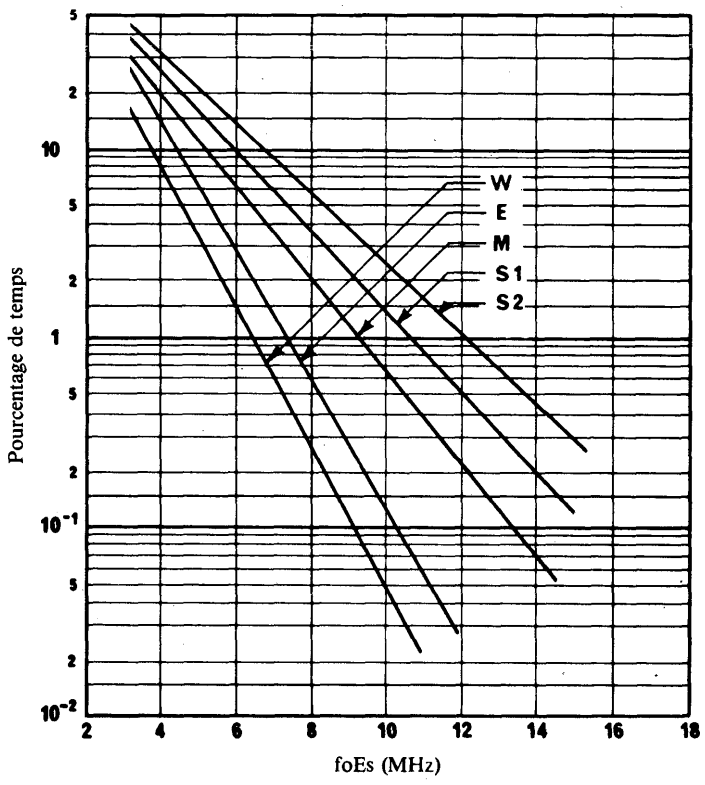


FIGURE 6 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pour les pourcentages de temps indiqués*

Valeur moyenne: régions A, B, C et D
S1: été
S2: été (08 h 00-23 h 00)
M: moyenne annuelle
E: équinoxe
W: hiver

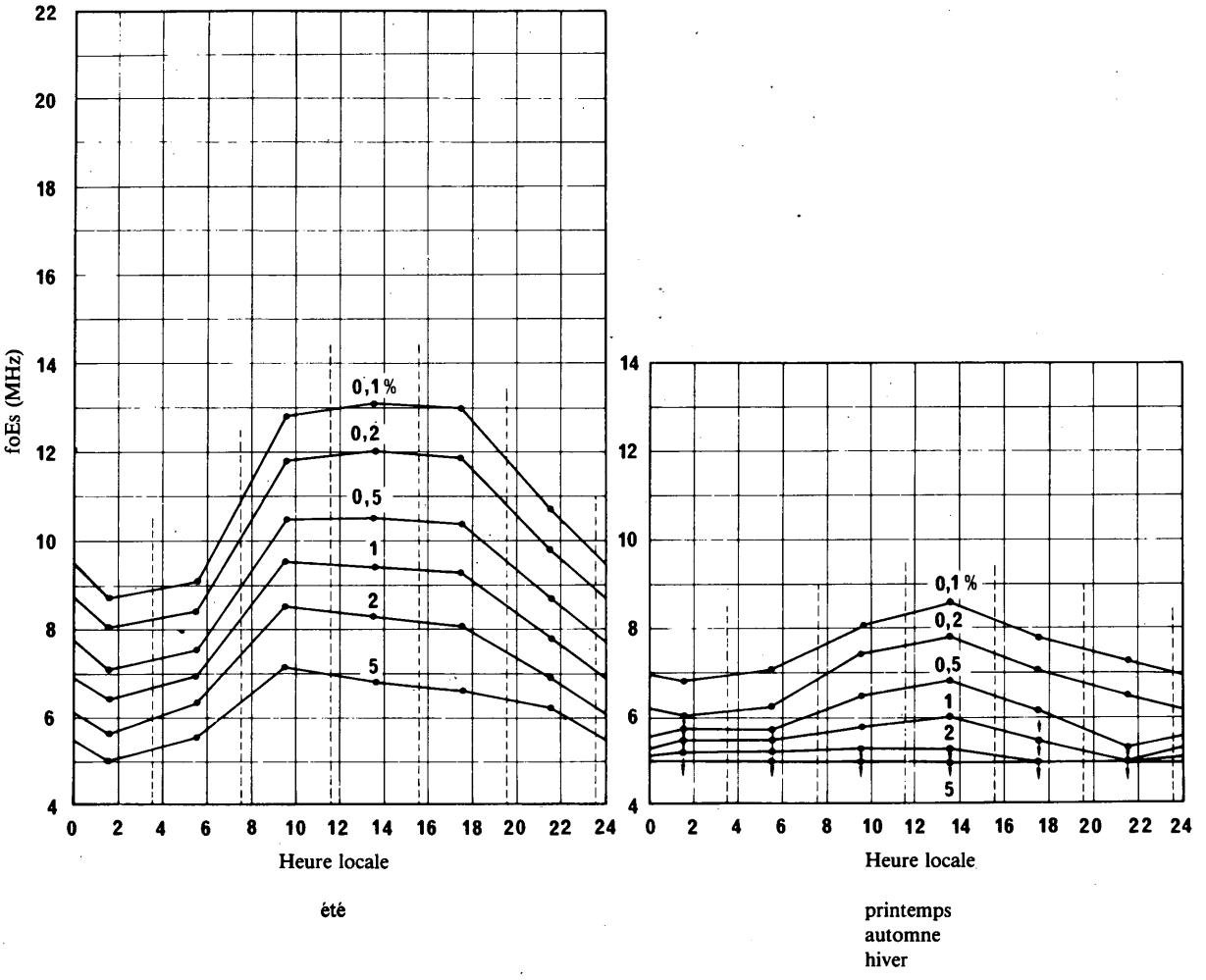


FIGURE 7 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région A (Europe et Afrique du Nord)*

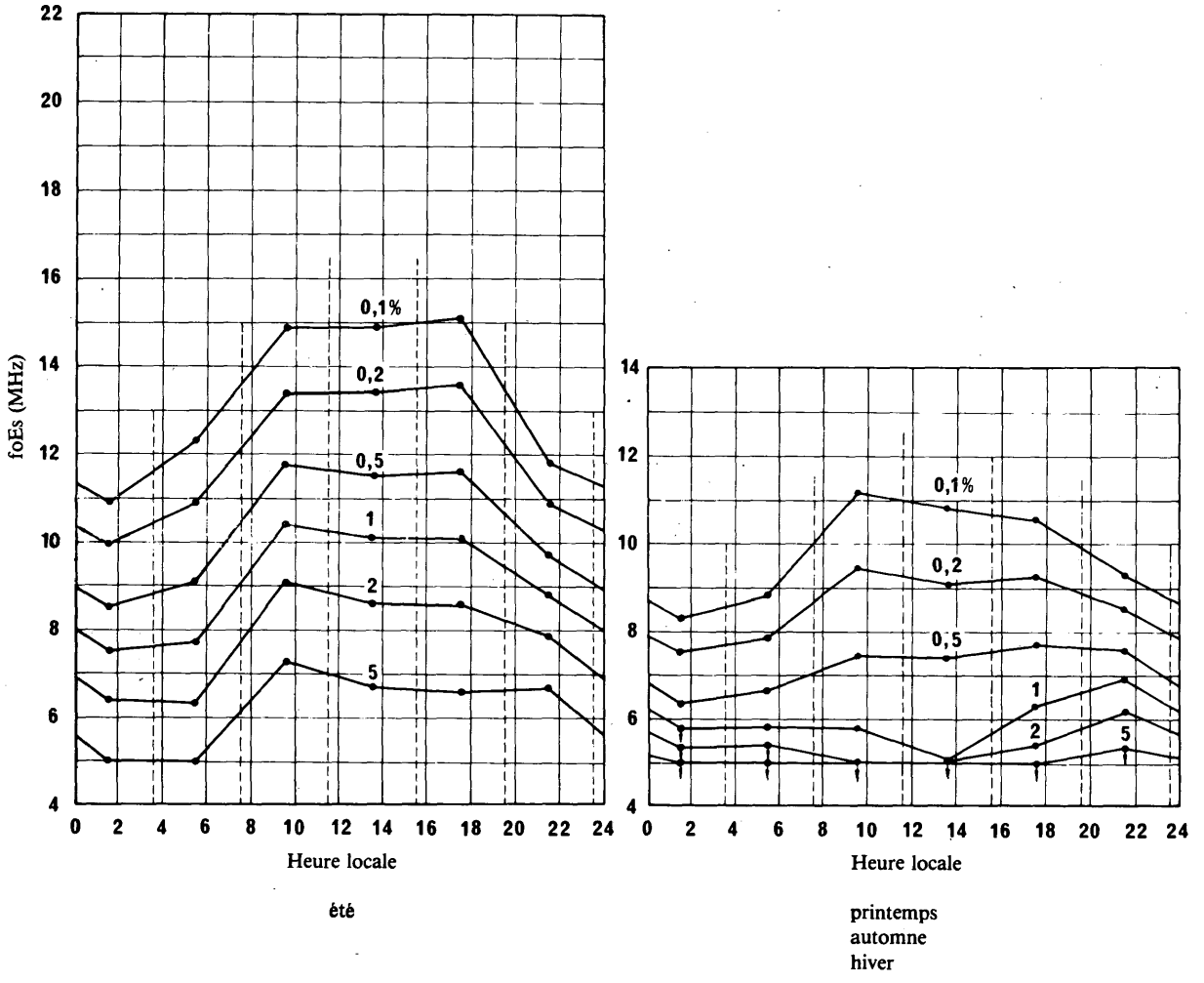


FIGURE 8 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région B (Amérique du Nord)*

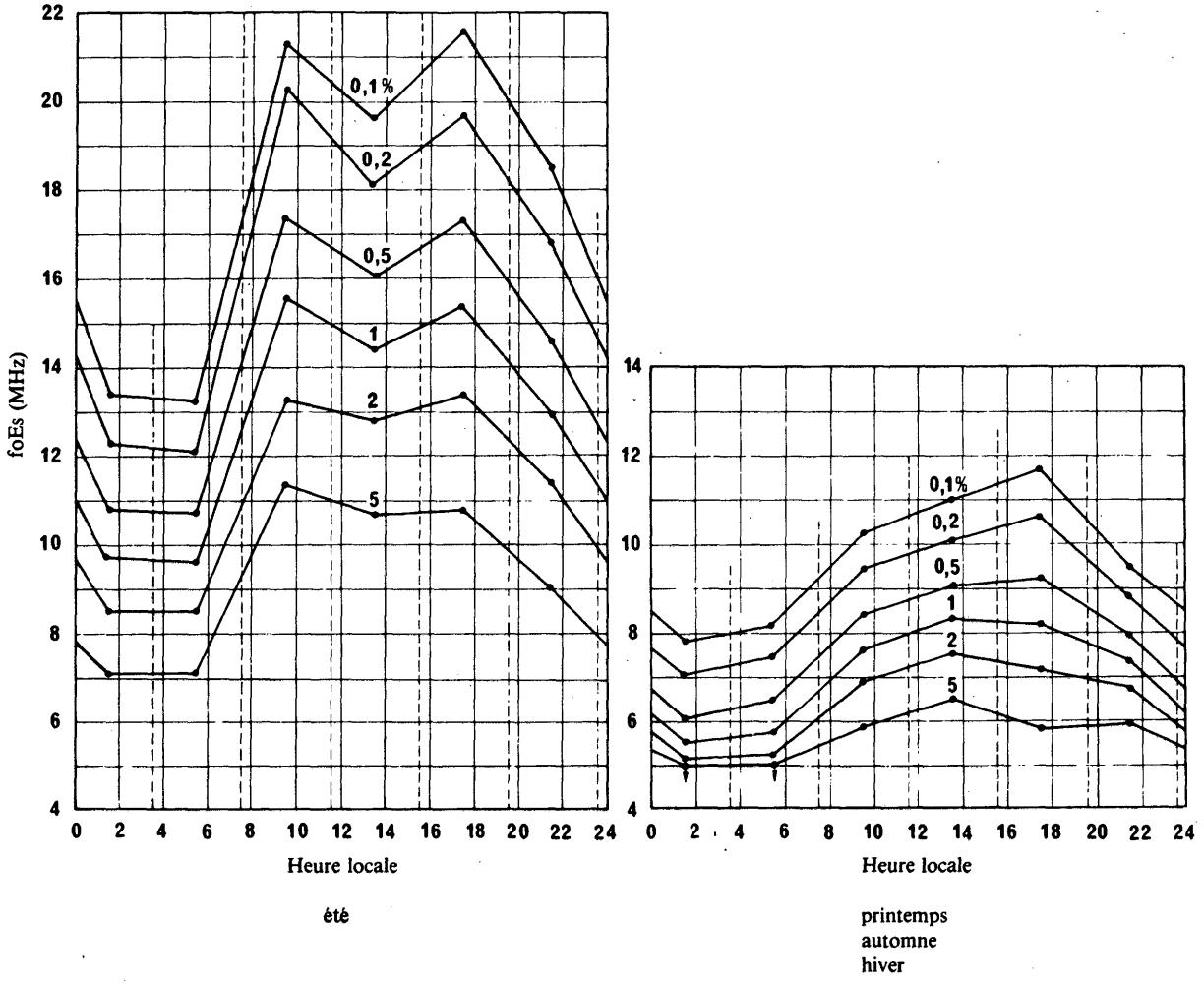


FIGURE 9 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués comme paramètre sur la courbe, à l'intérieur de tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région C (Asie (Extrême-Orient))*

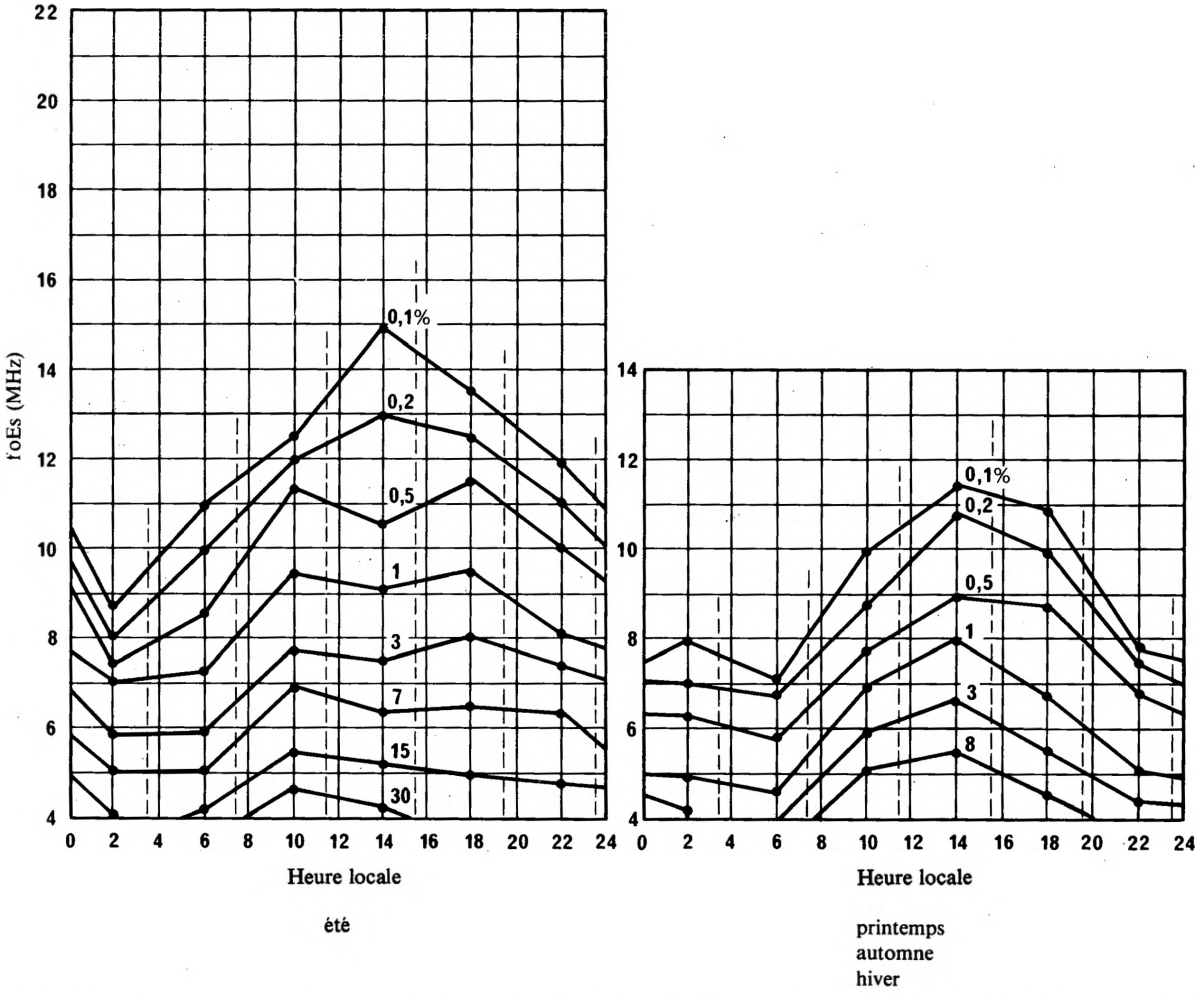


FIGURE 10 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région D (Amérique du Sud)*

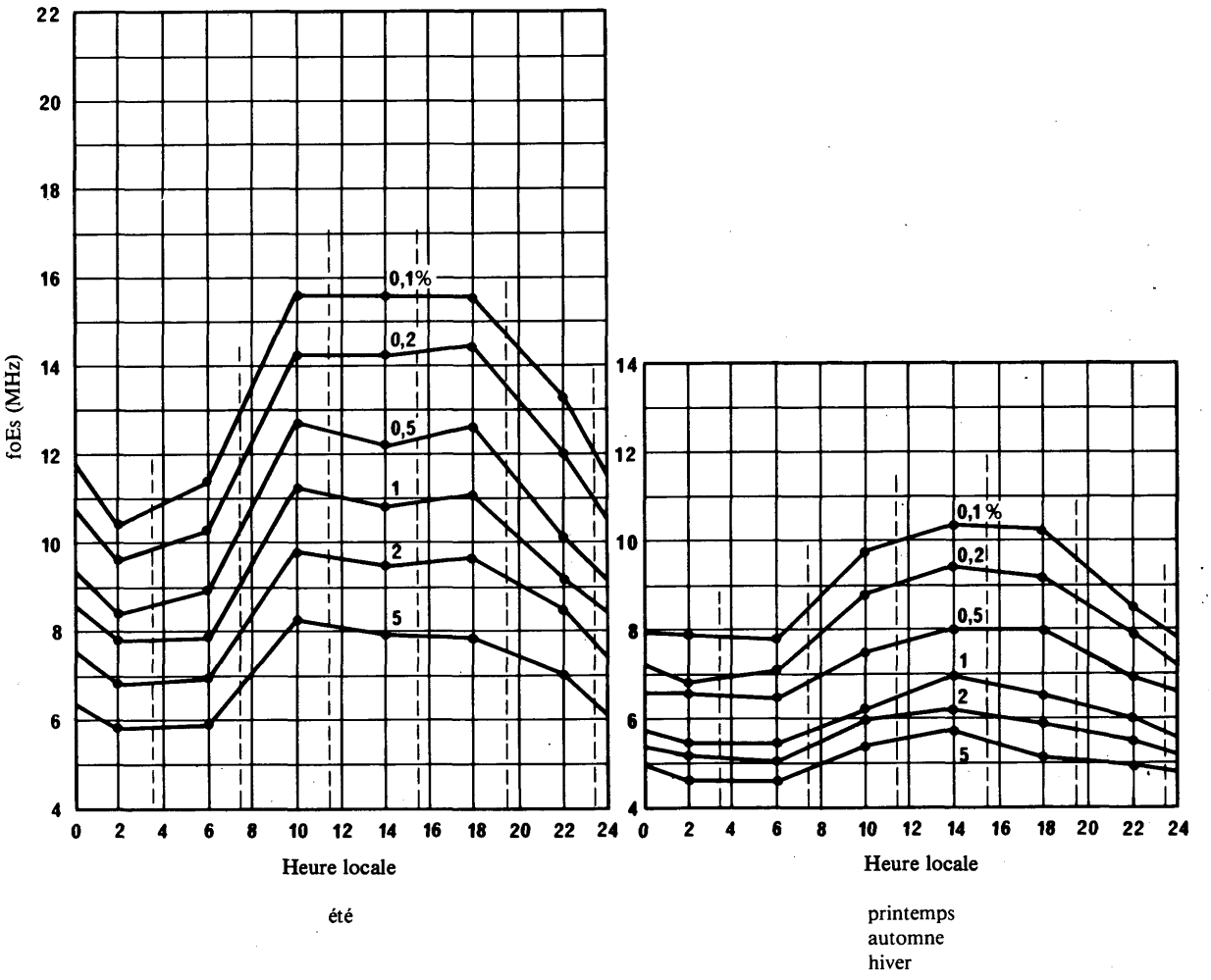


FIGURE 11 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) pour les régions A, B, C et D*

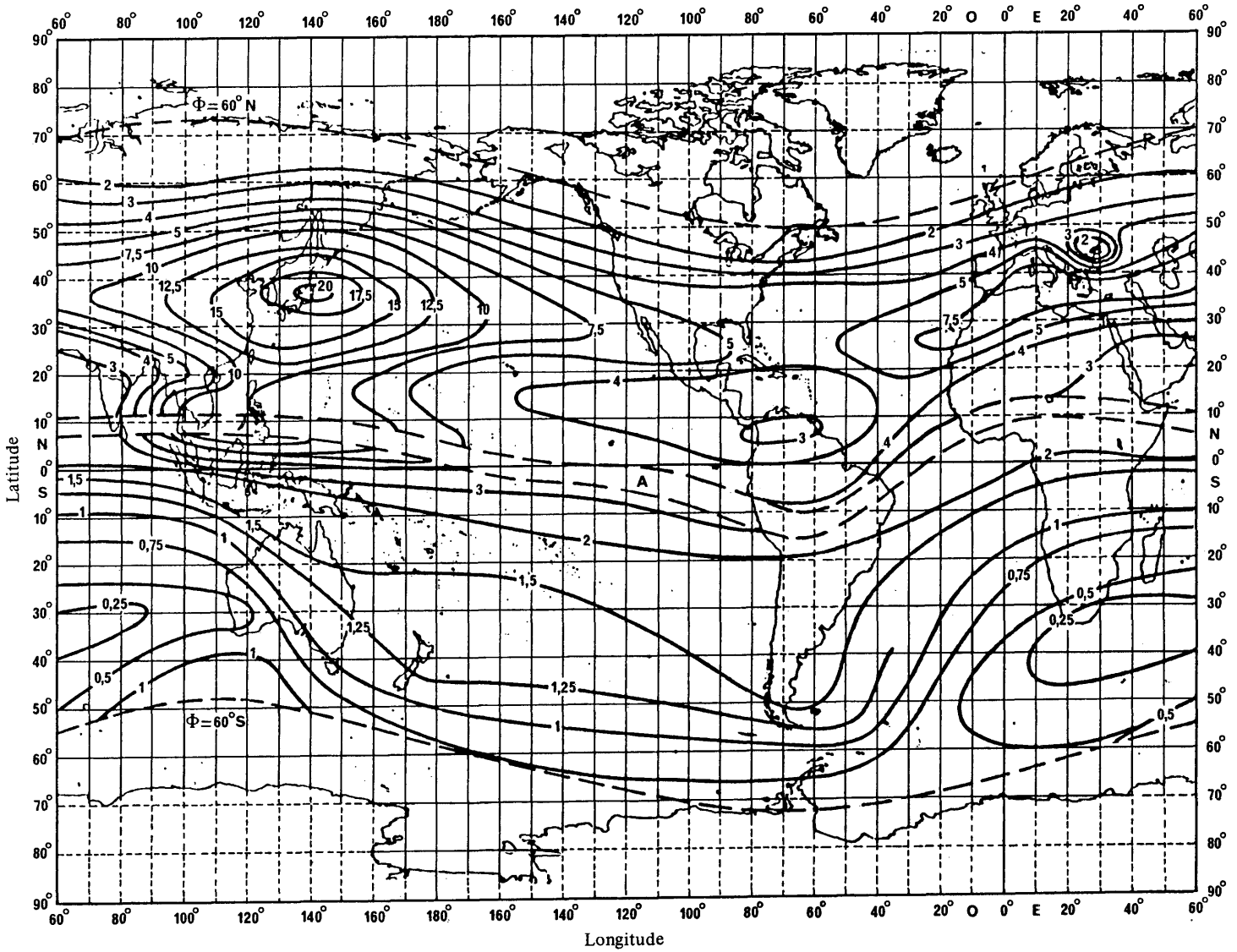


FIGURE 12 – *Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mai, juin, juillet et août*

A: région de basse latitude (voir le § 4)

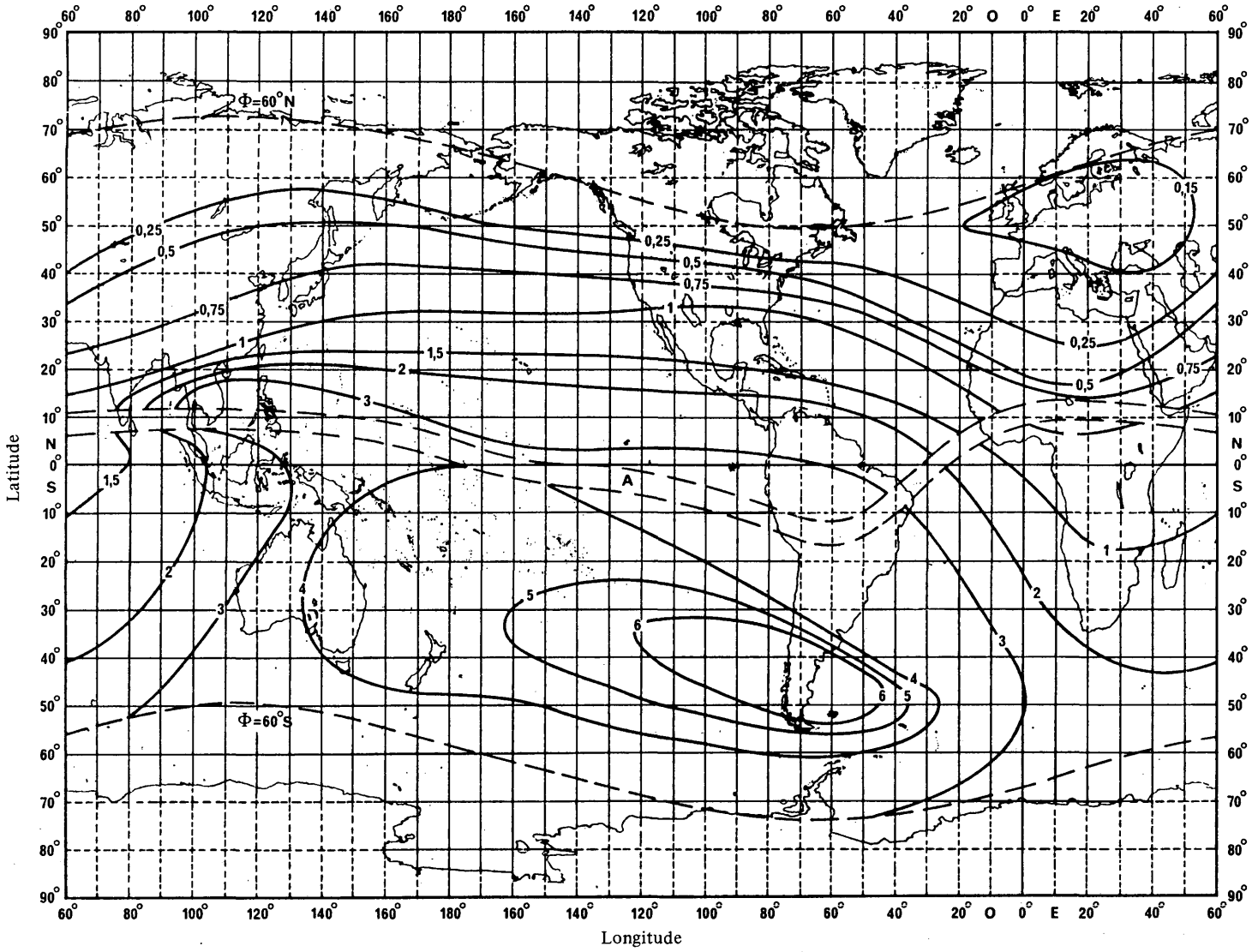


FIGURE 13 – *Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de novembre, décembre, janvier et février*

A: région de basse latitude (voir le § 4)

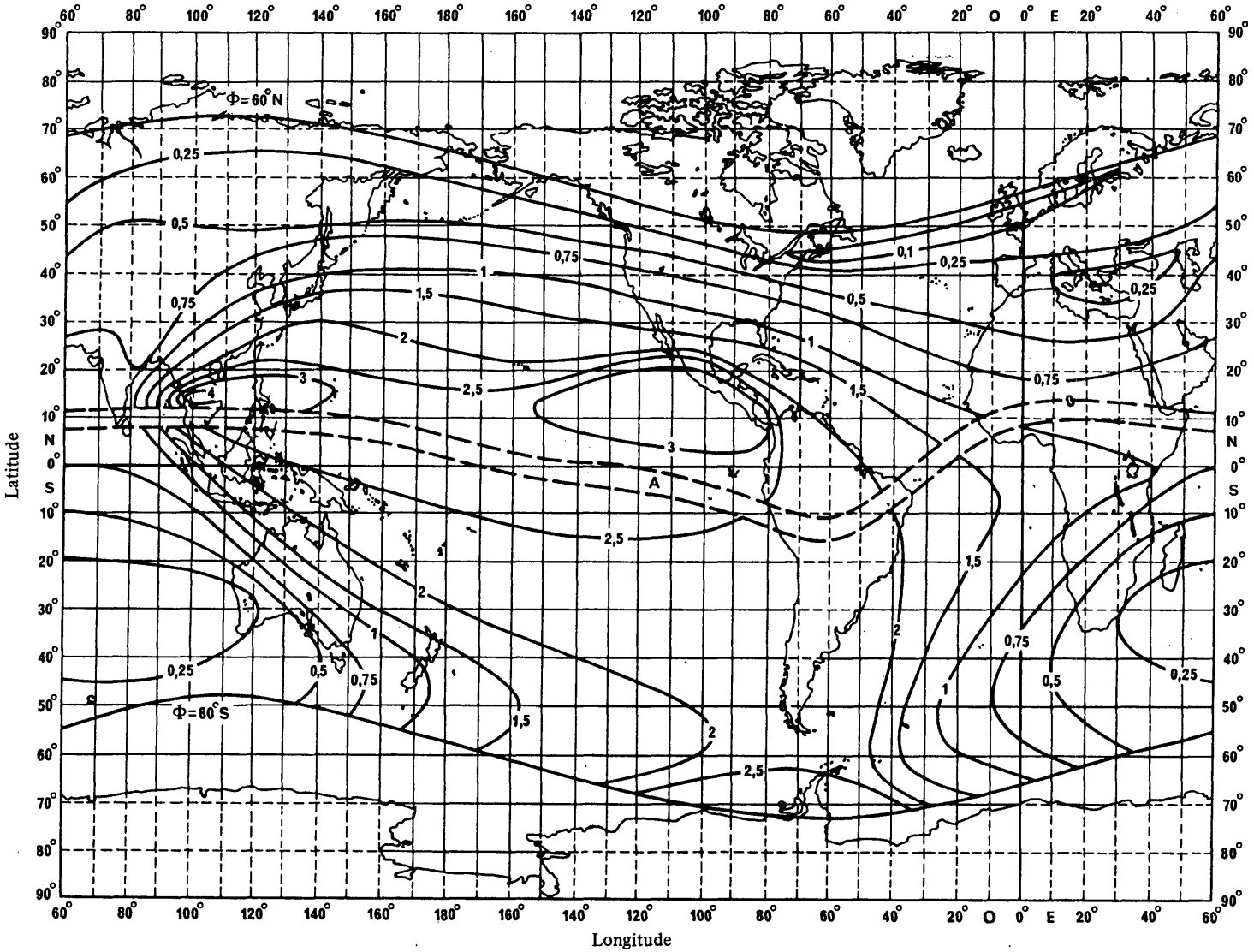


FIGURE 14 – *Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mars, avril, septembre et octobre*

A: région de basse latitude (voir le § 4)

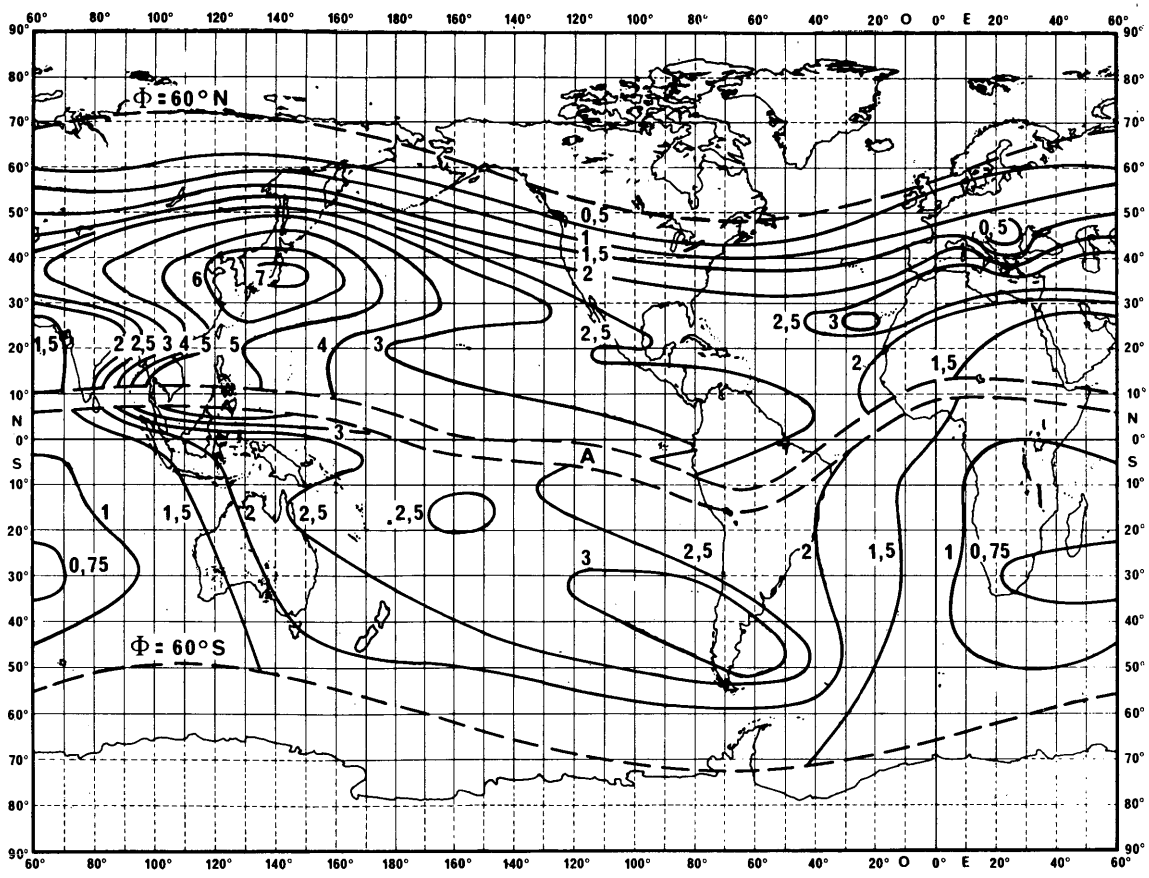


FIGURE 15 – *Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de l'ionisation sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale, dans les régions de moyenne latitude pendant les 12 mois de l'année*

A: région de basse latitude (voir le § 4)

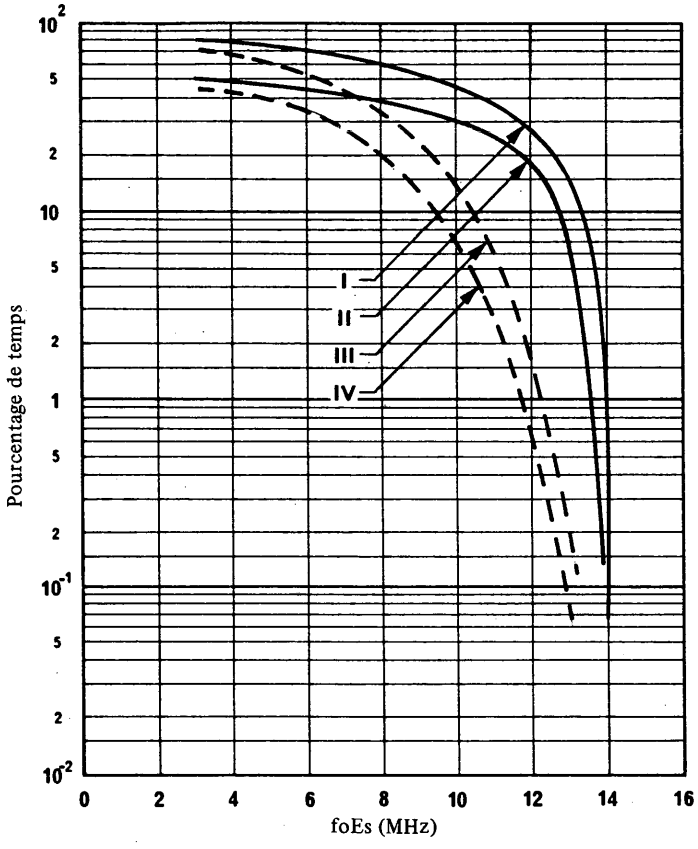


FIGURE 16 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région E: Asie équatoriale (latitude d'inclinaison ±6°)

I: années d'activité solaire maximale (0600-1800 h). Moyenne annuelle

II: années d'activité solaire maximale. Moyenne annuelle

III: années d'activité solaire médiane et faible (0600-1800 h) Moyenne annuelle

IV: années d'activité solaire médiane et faible. Moyenne annuelle

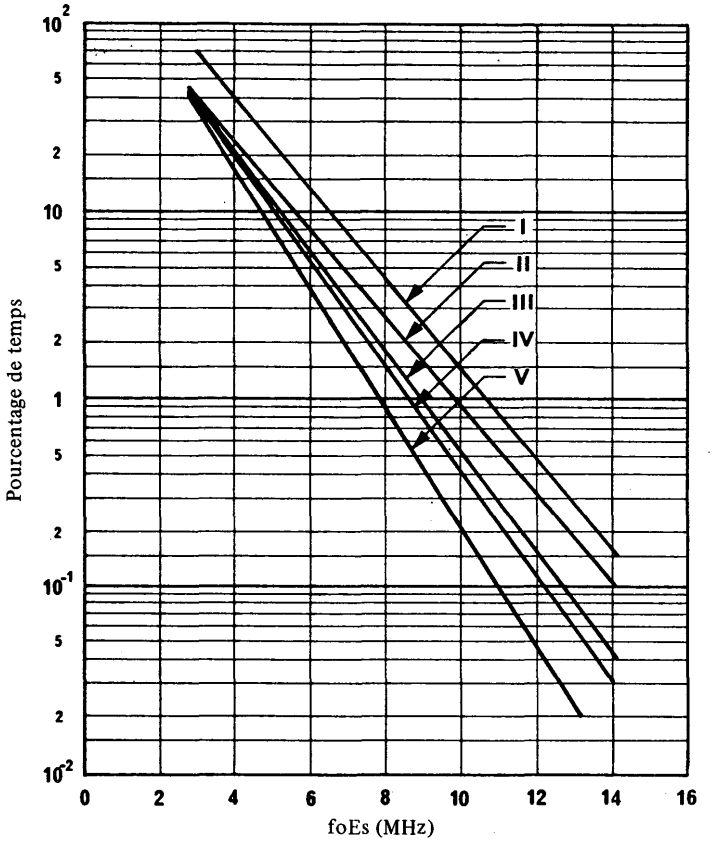


FIGURE 17 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région E: Asie subéquatoriale (entre ±6° et ±20° de latitude d'inclinaison)

I: été (0600-1800 h)

II: été

III: moyenne annuelle

IV: équinoxe

V: hiver

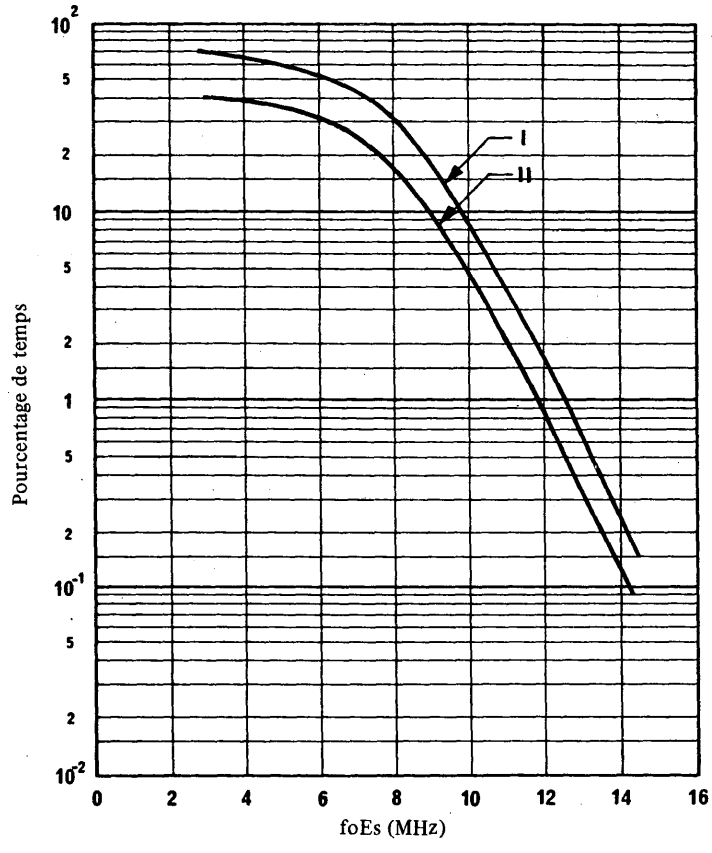


FIGURE 18 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région F: Afrique équatoriale (latitude d'inclinaison ±6°)
I: moyenne annuelle (0600-1800 h)
II: moyenne annuelle

Note. – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne. Par ailleurs, il n'y a pas de variation notable en fonction de l'activité solaire.

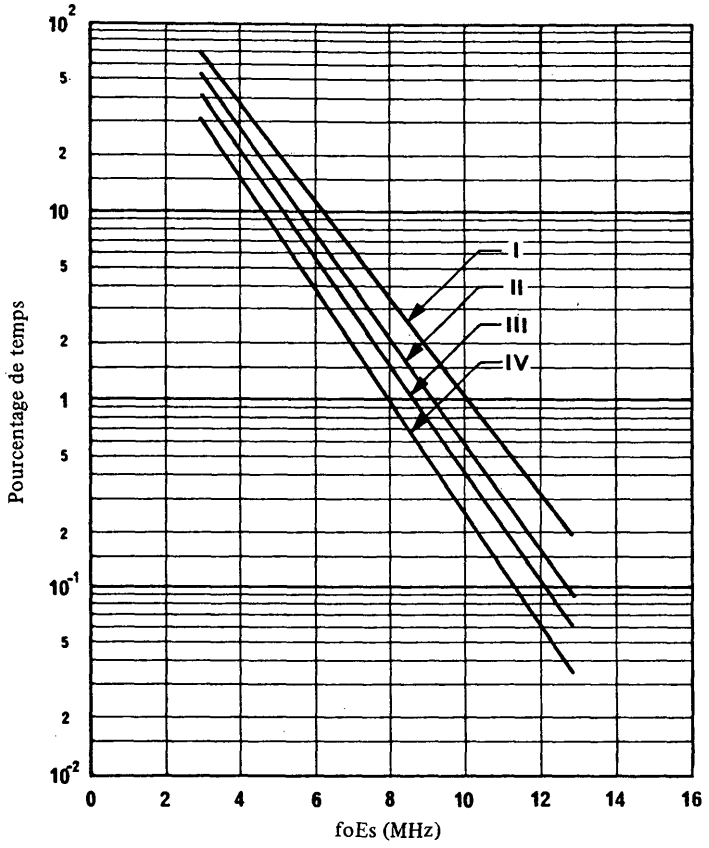


FIGURE 19 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région F: Afrique subéquatoriale (entre ±6° et ±20° de latitude d'inclinaison)

I: été (0600-1800 h)

II: été

III: moyenne annuelle et équinoxe

IV: hiver

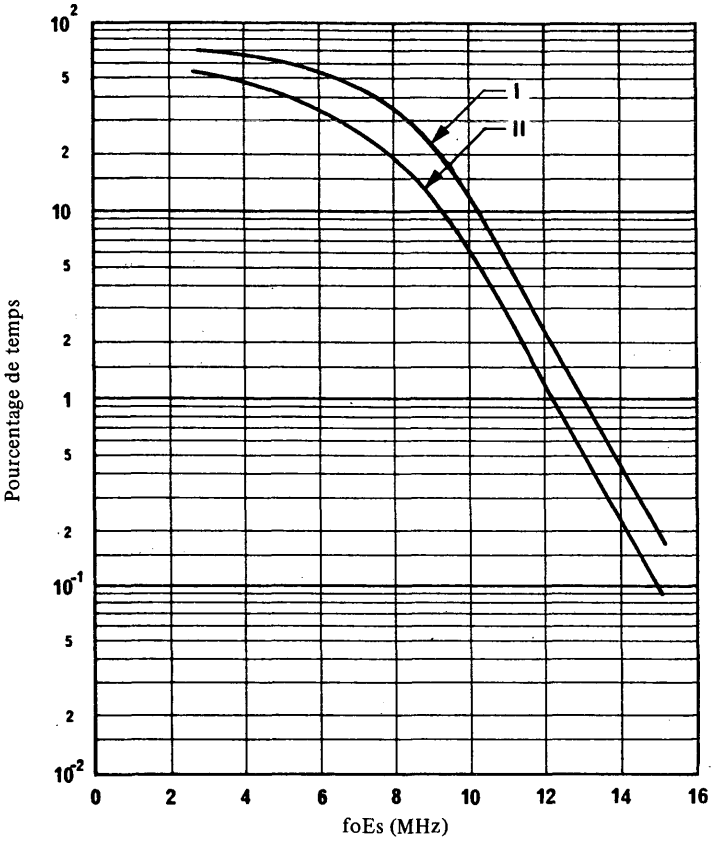


FIGURE 20 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région G: Amérique équatoriale (latitude d'inclinaison ±6°)
I: moyenne annuelle (0600-1800 h)
II: moyenne annuelle

Note. – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne.

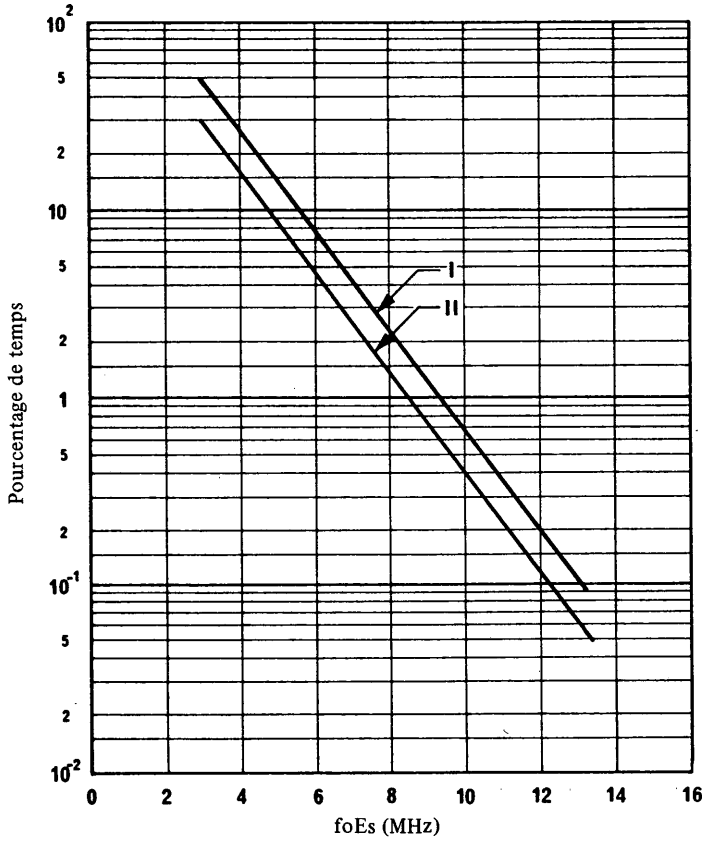


FIGURE 21 – *Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués*

Région G: Amérique subéquatoriale (entre ±6° et ±20° de latitude d'inclinaison)

I: moyenne annuelle

II: moyenne annuelle

Note. – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GIRALDEZ, A. E. [1984] Long distance Abnormal VHF propagation. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984* – SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.

MIYA, K. et SASAKI, T. [1966] Characteristics of ionospheric Es propagation and calculation of Es signal strength. *Radio Sci.*, Vol. 1, 99-108.

MIYA, K., SHIMIZU, K. et KOJIMA, T. [1978] Oblique-incidence sporadic-E propagation and its ionospheric attenuation. *Radio Sci.*, Vol. 13, **3**, 559-570.

SMITH, E. K. [1976] World maps of sporadic E (foEs > 7 MHz) for use in prediction of VHF oblique-incidence propagation. OT Special Publication 76-10, National Technical Information Service (NTIS) Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

SMITH, E. K. [1978] Temperate zone sporadic E maps (foES > 7 MHz) *Radio Sci.*, Vol. 13, **3**, 571-575.

UER [1976] Propagation ionosphérique des ondes métriques en Europe (Télévision en bande I). Document technique de l'UER TECH 3214, Vol. I et II. Centre technique, 32, Avenue Albert Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.

Documents du CCIR

[1978-82]: 6/63 (URSS).

BIBLIOGRAPHIE

MORO, E. S. M. [1984] Anamalous VHF propagations. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984.* SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.

RAPPORT 259-6

PROPAGATION DES ONDES MÉTRIQUES PAR L'INTERMÉDIAIRE DES COUCHES NORMALES, DE L'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E OU D'AUTRES PHÉNOMÈNES D'IONISATION ANORMALE

(Programme d'études 30B/6)

(1951-1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Couches normales

La propagation des ondes métriques par la couche E normale est, à tout moment, peu probable.

La propagation par réflexion sur la couche F1 peut se produire pour des fréquences supérieures à 30 MHz, mais la valeur la plus élevée de la MUF de référence correspond généralement à la propagation par la couche F2 et non à la propagation par la couche F1.

Au voisinage du maximum du cycle d'activité solaire, les transmissions à grande distance par la couche F2, sous des latitudes moyennes, peuvent se faire pendant un pourcentage de temps appréciable, pour des fréquences atteignant ou dépassant 50 MHz. Sous des latitudes basses, une transmission régulière se produit sur des fréquences situées aux alentours de 30 à 40 MHz; il arrive même qu'une telle transmission se produise à 60 MHz et plus. La fréquence la plus basse sur laquelle le brouillage dû à une telle propagation devient rare au point qu'il peut être considéré comme insignifiant est environ 60 MHz pour les stations situées aux latitudes moyennes et environ 70 MHz pour les stations situées aux basses latitudes (voir Fig. 1, 2, 3).

Un rapport concernant la propagation normale de signaux de télévision en ondes métriques a été élaboré en Inde [Saksena, 1979]. La propagation de signaux télévisuels à ondes métriques d'environ 60 MHz sur un trajet de 3100 km à partir de Bangkok, a fait également l'objet d'observations à Rohtak (Inde), en particulier pendant les mois d'équinoxe et la période d'activité solaire intense due à la propagation par la couche ionosphérique F à des fréquences supérieures à la MUF de référence. La réception des signaux s'est faite à 2000 heure locale et pour des durées comprises entre une et deux heures et demie [CCIR, 1982-86].

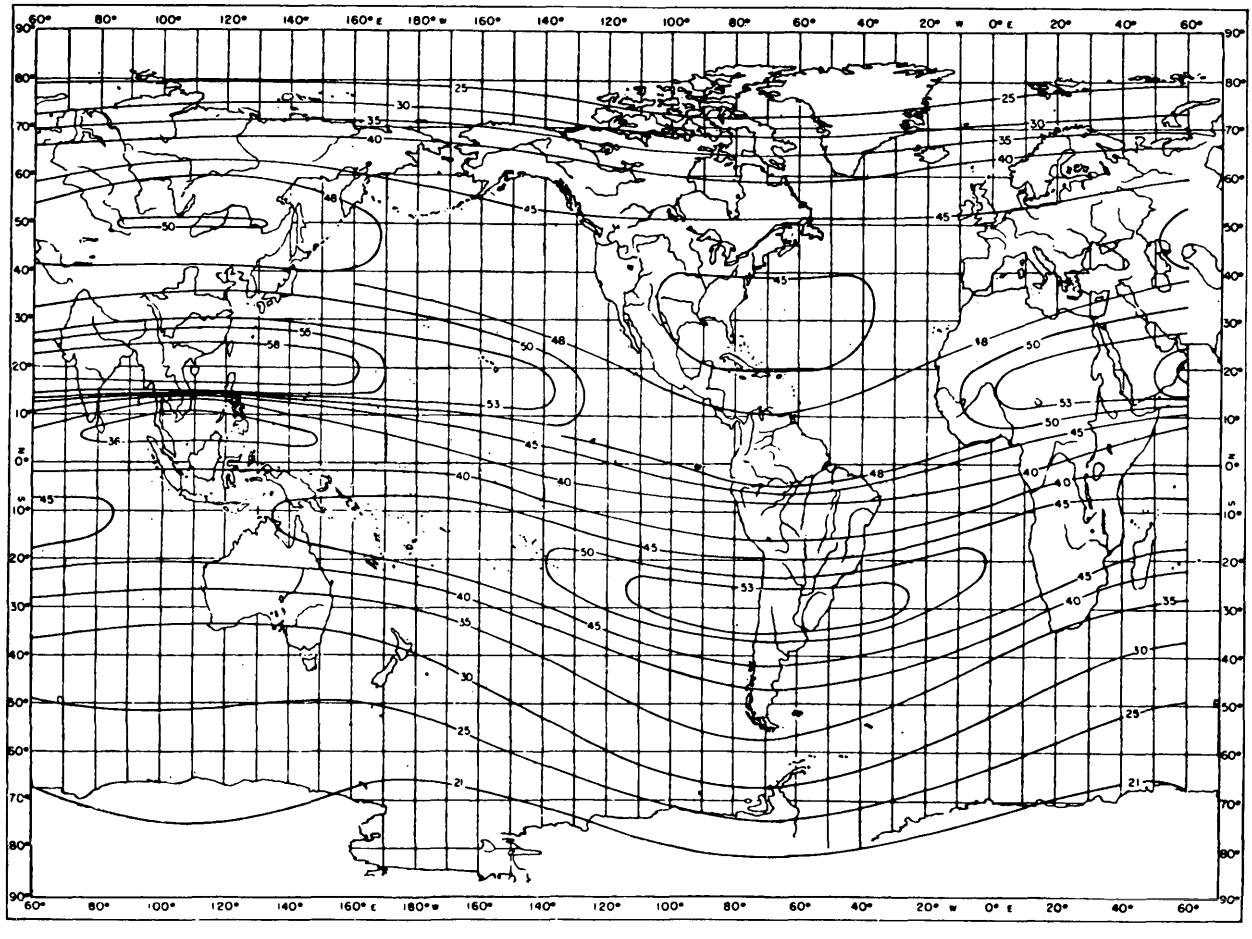


FIGURE 1 – *F2 (4000) MUF dépassée pendant 1 % des heures – Solstice de décembre; maximum du nombre de taches solaires*

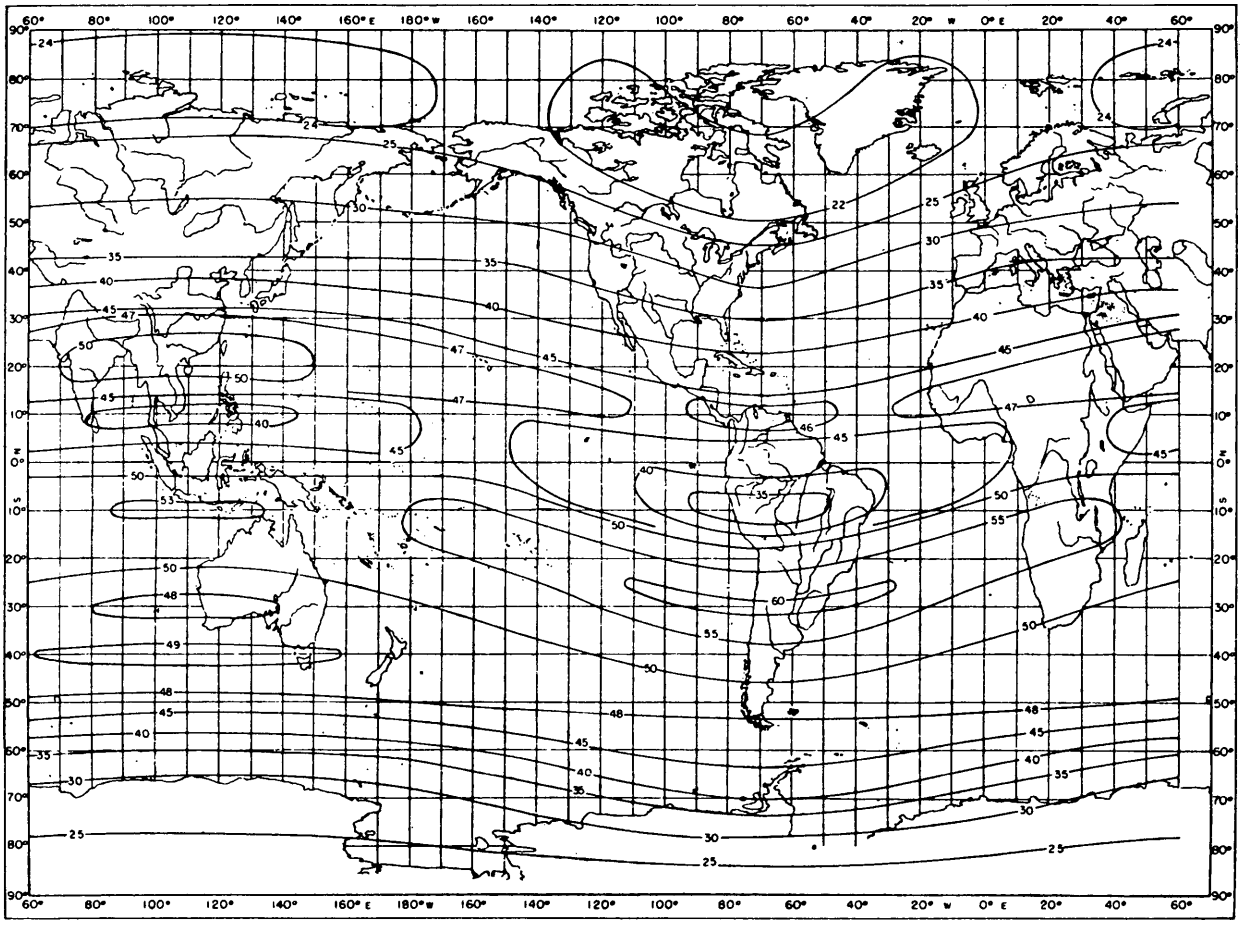


FIGURE 2 – *F2 (4000) MUF dépassée pendant 1% des heures – Solstice de juin; maximum du nombre de taches solaires*

2. Ionisation sporadique de la région E

L'ionisation sporadique de la région E, aux latitudes moyennes se présente comme un renforcement de l'ionisation sous l'aspect de nappes horizontales dont l'épaisseur moyenne est voisine de 1 km et dont les dimensions horizontales sont de l'ordre de 100 km. L'altitude est d'ordinaire de 100 à 120 km. Les nappes apparaissent de façon erratique, mais de préférence à certaines heures et en certains mois de l'année (voir aussi les Rapports 725 et 255).

Les manifestations de propagation par les couches E sporadique deviennent plus rares quand la fréquence augmente. Leur effet peut être considéré comme négligeable au-dessus de 90 MHz, sauf en tant que source de brouillage pour des circuits dont on exige une haute fiabilité. Canivenc [1975] a établi un rapport détaillé sur les observations faites par des radioamateurs sur des fréquences atteignant jusqu'à 144 MHz, en Europe, au cours d'une manifestation d'ionisation intense des couches E sporadique, le 4 juillet 1965. Aux fréquences supérieures à 30 MHz, la propagation par les couches E sporadique s'effectue rarement à des distances inférieures à 500 km; la distance limite pour un seul bond est d'environ 2600 km. Canivenc [1975, 1977, 1979, 1983 et 1985] a publié des rapports détaillés établis sur la base d'observations effectuées par des radioamateurs à des fréquences allant jusqu'à 144 MHz dans la région de l'Europe.

2.1 *Variations géographiques et temporelles*

Il y a trois zones principales pour E sporadique: équatoriale, tempérée et aurorale. La zone équatoriale consiste en une ceinture s'étendant de part et d'autre de l'équateur magnétique jusqu'à 6° d'inclinaison magnétique et dont le bord se déplace d'environ 1° de latitude magnétique entre l'été et l'hiver; c'est au solstice d'été que ce bord est le plus éloigné de l'équateur magnétique. Une forme très transparente d'ionisation sporadique de la région E (Es de type *q*) se manifeste régulièrement sur la partie éclairée de cette zone et peut être associée à l'électrojet équatorial. On observe pendant des pourcentages élevés du temps et avec des différentes marquées entre les divers continents, des échos sous incidence verticale provenant de la couche Es équatoriale, à des fréquences supérieures à 7 MHz [Giraldez, 1980]. La propagation des ondes métriques par l'intermédiaire de E sporadique de type *q* s'effectue par diffusion.

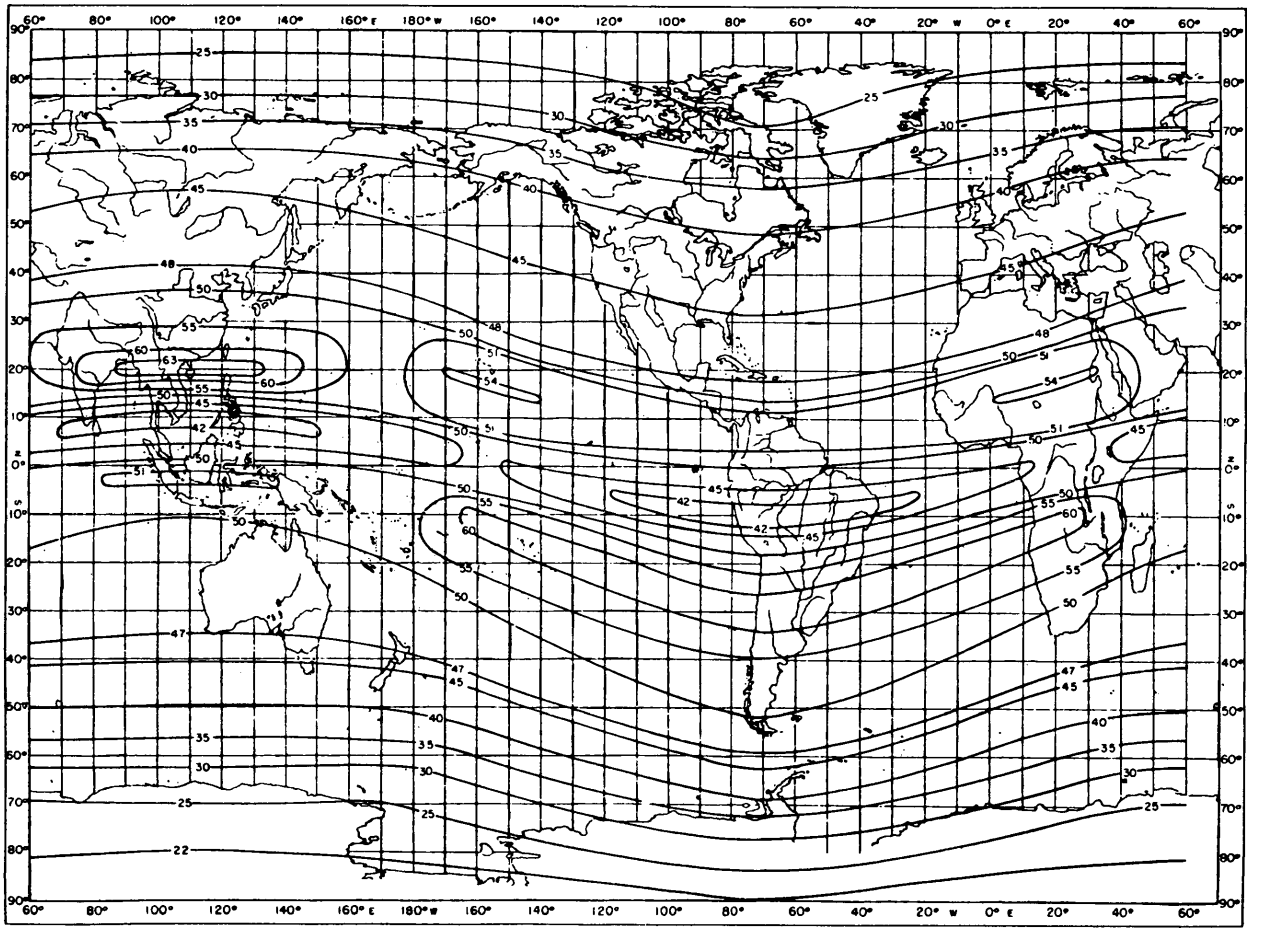


FIGURE 3 – *F2 (4000) MUF dépassée pendant 1 % des heures – Equinoxe; maximum du nombre de taches solaires*

Les zones tempérées couvrent la plus grande partie de la Terre et s'étendent de la zone équatoriale jusqu'à la latitude géomagnétique de 60° environ (en fait jusqu'à la latitude pour laquelle la probabilité d'apparition des aurores atteint 15% de son maximum). Dans les zones tempérées, le phénomène le plus important est le maximum très net que l'on observe en été dans la fréquence d'apparition d'ionisation E sporadique intense; ce maximum devient plus marqué lorsqu'on se rapproche des latitudes élevées, jusqu'à ce qu'il soit considérablement altéré par les phénomènes de la zone aurorale. L'ionisation E sporadique est rarement présente entre minuit et 0600 heure locale. Elle apparaît le plus fréquemment aux environs de 1000 heure locale et dans certaines régions, parfois aussi dans l'après-midi ou dans la soirée. L'ionisation E sporadique est souvent très dense pendant la journée. Dans les zones tempérées, la probabilité d'apparition de E sporadique présente des variations importantes en fonction de la longitude aussi bien que de la latitude. Un mécanisme associé aux cisaillements de vent semble pouvoir fournir une explication pour les ionisations sporadiques intenses dans la région E aux latitudes tempérées.

Dans les zones aurorales, le phénomène prédominant est le maximum de nuit présenté par la probabilité d'apparition de E sporadique. Le maximum observé en été aux latitudes tempérées disparaît complètement dans la zone de maximum des aurores visibles. Les zones aurorales, comme la zone équatoriale, sont des régions où un courant important circule dans la basse ionosphère. De plus, ce sont des régions où des couches ionisées peuvent être formées par les précipitations de particules chargées. Il semble que ces deux phénomènes puissent être responsables de l'ionisation E sporadique. L'apparition de la couche E sporadique dans les régions aurorales est étroitement liée à l'ovale auroral instantané [Wagner et autres, 1973]. Le rôle des précipitations de particules chargées, des courants ionosphériques et des cisaillements de vent dans la formation de l'ionisation E sporadique, ainsi que la morphologie et la structure de cette ionisation ont été décrits par Hunsucker [1975], Wilson et autres [1976] et Wright et Hunsucker [1983]. Le phénomène prédominant semble être la précipitation de particules aurorales (1-10 keV).

2.2 *Evaluation de l'intensité des signaux transmis par l'intermédiaire de E sporadique*

L'unique source importante et continue de données concernant E sporadique est le réseau mondial des stations ionosphériques. Il est par conséquent important de développer des méthodes quantitatives pour déterminer, à partir des données obtenues en incidence verticale, les caractéristiques des transmissions en incidence oblique. Une étude de ce problème a été faite, pour les Etats-Unis d'Amérique, par Davis et autres [1959].

Le problème a aussi été étudié au Japon par Miya et Sasaki [1966] et par Miya et autres [1978]. E sporadique est d'abord caractérisée par son coefficient de réflexion Γ observé sur des liaisons en ondes métriques. L'étude suggère que si $\Gamma \leqslant 45$ dB, la réflexion sur E sporadique est spéculaire, tandis que si 45 dB $< \Gamma <$ 70 dB, la propagation implique une diffusion. Des courbes permettent de calculer Γ en fonction du rapport f/foEs, où f est la fréquence d'émission et foEs la fréquence critique, sous incidence verticale, de l'onde ordinaire réfléchie sur E sporadique que l'on relève sur les ionogrammes. On possède ainsi des estimations pour la propagation par E sporadique par un bond unique (0 à 2600 km) et par deux bonds (2600 à 4000 km). Cette méthode a l'avantage de tenir compte de la perte de couplage entre l'antenne et le milieu de propagation.

Le Groupe de travail intérimaire 6/8 a étudié l'affaiblissement de réflexion du signal transmis par la couche E sporadique en appliquant la méthode d'analyse utilisée dans l'étude conduite au Japon et ci-dessus exposée. Les travaux ont fait appel à de nombreuses données obtenues à des latitudes moyennes, y compris des données tirées des campagnes de mesure organisées par l'UER de 1962 à 1972 [UER, 1976]. La méthode élaborée par le GTI 6/8 pour calculer l'intensité des signaux en ondes métriques transmis par l'intermédiaire de E sporadique, pour un certain pourcentage du temps d'occurrence, est décrite dans l'Annexe I à la Recommandation 534. Cette méthode n'est pas seulement applicable dans le cas des ondes métriques, mais on pense qu'elle est également valable dans la moitié supérieure de la bande des ondes décamétriques, s'il est tenu compte de l'absorption sans déviation dans la région D [CCIR, 1974-78].

Une série de mesures a été effectuée en Italie en 1973 et 1974 à des distances comprises entre 1000 km et 2500 km d'émetteurs de télévision pour déterminer, à 55 MHz environ, le champ brouilleur dû à la propagation par E sporadique. Les résultats obtenus ont indiqué un maximum aplati du champ à une distance proche de 1800 km; ils concordent bien avec les résultats des prévisions fondées sur la méthode décrite par Miya et autres [1978].

Une méthode a été mise au point en URSS permettant de calculer l'irrégularité horizontale de la couche Es qui se caractérise par l'angle d'inclinaison des isolignes de densité électronique déduites de données obtenues par sondage vertical. Cette méthode a été utilisée pour calculer les effets de focalisation et de défocalisation sur les ondes réfléchies provoqués par la couche Es [Kerblai et Kishcha, 1985].

L'analyse de données provenant de la ceinture équatoriale montre que le pourcentage du temps d'occurrence de l'ionisation E sporadique est beaucoup plus élevé pour les trajets dont le point de réflexion est situé dans la ceinture équatoriale et l'on constate qu'il est en relation sensiblement linéaire avec la fréquence maximale de réflexion verticale; ce comportement est donc différent de la relation logarithmique bien connue sous le nom de la loi de Phillips, admise aux latitudes moyennes.

2.3 *Occurrence de la propagation oblique par la couche E sporadique*

D'après des études préliminaires effectuées dans le secteur de l'Amérique du Sud, le comportement de la propagation oblique par la couche E sporadique dans ledit secteur peut être décrit de façon acceptable par les caractéristiques indiquées ci-après à propos du secteur européen.

Des sondages sous incidence oblique entre la Grèce et la République Fédérale d'Allemagne (1700 km) [Reinisch, 1965] ont montré que la fréquence maximale observée (MOF) est souvent déterminée, de mai à fin septembre, par des réflexions sur E sporadique. La probabilité moyenne d'apparition, pendant le jour (0600 à 1800 heure locale) était environ 10% sur 22 MHz et s'annulait presque sur 30 MHz. Les données obtenues sous incidence oblique sur les trajets Ottawa-La Haye (5500 km) et Winnipeg-Resolute Bay (2800 km) montrent que le mode de propagation par E sporadique détermine parfois la MUF d'exploitation, mais que la propagation s'effectue rarement par E sporadique sur ces trajets aux fréquences supérieures à 30 MHz [Stevens, 1968].

Des fréquences de plasma atteignant 14,9 MHz à une altitude de 100 km ont été observées près de Fairbanks, Alaska [Wilson et autres, 1976]. Dans l'hypothèse d'un facteur de sécante limité par la courbure de la Terre et supposé égal à 5, la MUF est égale à 74,5 MHz. La propagation par l'ionisation E sporadique sur des trajets polaires atteignant 5000 km a été observée avec des MUF allant jusqu'à 46 MHz [Hunsucker, 1979].

Depuis 1962, l'UER [Lari et autres, 1967] a effectué des enregistrements sur 23 trajets qui s'étendent dans diverses directions en Europe occidentale et dont la longueur varie de 900 à 2510 km. Les mesures ont été effectuées sur 5 fréquences comprises entre 41 et 59 MHz, tous les jours de 0800 à 2300 h UTC, chaque année d'avril à fin octobre. Les résultats peuvent être résumés comme suit:

- les résultats diffèrent beaucoup d'une année à l'autre et l'on a observé des écarts du champ allant jusqu'à 35 dB;
- le mois d'ionisation sporadique maximale de la région E varie entre la fin du printemps et la fin de l'été;
- pour un trajet donné, ce mois varie d'une année à l'autre et, pour une année donnée, il varie d'un trajet à l'autre;
- des études sur la variation du champ avec la distance ont montré que les valeurs maximales du champ (dépassées pendant 1% du temps) se rencontrent à une distance d'environ 1400 à 1500 km; à ces distances, la valeur du champ dépassée pendant 5% du temps était inférieure d'environ 15 à 30 dB. Pour une distance de 2500 km, les valeurs correspondantes du champ n'étaient que de 10 à 20 dB inférieures à celles relevées sur 1500 km. Ce résultat donne à penser que la réfraction atmosphérique et l'emploi d'antennes surélevées permettent d'augmenter la portée maximale, dans une propagation ionosphérique en ondes métriques à un seul bond, au-delà de la portée normalement obtenue aux fréquences plus basses.

Les observations effectuées au cours d'une période de 11 années, couvrant un cycle complet d'activité solaire, montrent qu'il n'existe pas de corrélation simple à long terme entre l'activité solaire* et la propagation en ondes métriques par E sporadique. On a pu cependant constater que les variations annuelles sont assez régulières et que leur allure tendrait à être la même pour différents trajets.

Le Tableau I indique les années où l'on a observé les valeurs de champ maximales et minimales.

TABLEAU I

Trajet	f (MHz)	Valeurs du champ maximales	Valeurs du champ minimales
Divis — Enköping	41,465	1964, 1966, 1971	1965, 1967/8
Divis — Châtonnaye	41,465	1964, 1966, 1971	1965, 1967/8
Meldrum — Enköping	58,215	1963/4, 1966	1965
Divis — Monte-Lauro	41,465	1964, 1968/9, 1971	1963, 1965/6, 1970

Une analyse, faite à Aberystwyth (Royaume-Uni), de plusieurs années d'enregistrement du champ reçu sur trois fréquences de la bande des ondes métriques a permis d'établir des statistiques du comportement dans le temps de phénomènes d'ionisation E sporadique observés [Edwards et autres, 1983]. Ces statistiques portent sur environ 9 années d'enregistrement aux fréquences 59,25 et 62,25 MHz et sur environ six années d'enregistrement à la fréquence 77,25 MHz. Les signaux provenaient de stations de radiodiffusion situées pour la plupart en Europe centrale et en Europe de l'Est, situées à des distances de 1000 à 2000 km, et de puissance apparente rayonnée comprise entre 50 et 100 kW. L'analyse a été limitée chaque jour à la période comprise entre 0600 et 2300 h UTC car il y a peu d'émissions régulières de radiodiffusion en dehors de ces heures.

Les Fig. 4a) et 4b) montrent la durée moyenne totale des phénomènes d'ionisation E sporadique pour les trois fréquences, mois par mois. Elles se rapportent respectivement aux cas où le niveau du champ dépasse 3 dB(μV/m) et 13 dB(μV/m). Une variation saisonnière bien visible y apparaît: l'ionisation E sporadique s'y manifeste comme un phénomène estival; son activité entre septembre et avril est très faible. Un fait remarquable est que l'occurrence de cette ionisation sporadique est plus fréquente sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz, ce qui est contraire à ce que l'on admet généralement au sujet de l'influence de la fréquence sur ce phénomène. Cependant, dans une comparaison de cette sorte, il est important de prendre en considération la distribution géographique des sources d'émission sur chaque fréquence ainsi que leur nombre. Bien que l'on trouve moins de stations fonctionnant sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz, leur répartition sur un arc ayant pour centre Aberystwyth est beaucoup plus large, aussi le nombre des trajets de propagation possibles pourrait-il sans doute être plus grand sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz.

Les Fig. 4a) et 4b) montrent que le maximum d'activité a lieu en juin. Les pourcentages du temps total soumis à l'analyse pendant lequel on a observé des phénomènes d'ionisation E sporadique sont résumés dans le Tableau II pour chacune des trois fréquences.

TABLEAU II – *Pourcentages maximaux du temps pendant lequel on a observé en moyenne la propagation par ionisation E sporadique*

	59,25 MHz	62,25 MHz	77,25 MHz
3 dB (μV/m)	8	12	2
13 dB (μV/m)	5	6	1,3

Les Fig. 5a) et 5b) montrent la variation diurne moyenne de la durée des phénomènes d'ionisation E sporadique pour les mois d'été (mai à août).

* Maximum d'activité solaire: 1968/1969; minimum: 1964/1965.

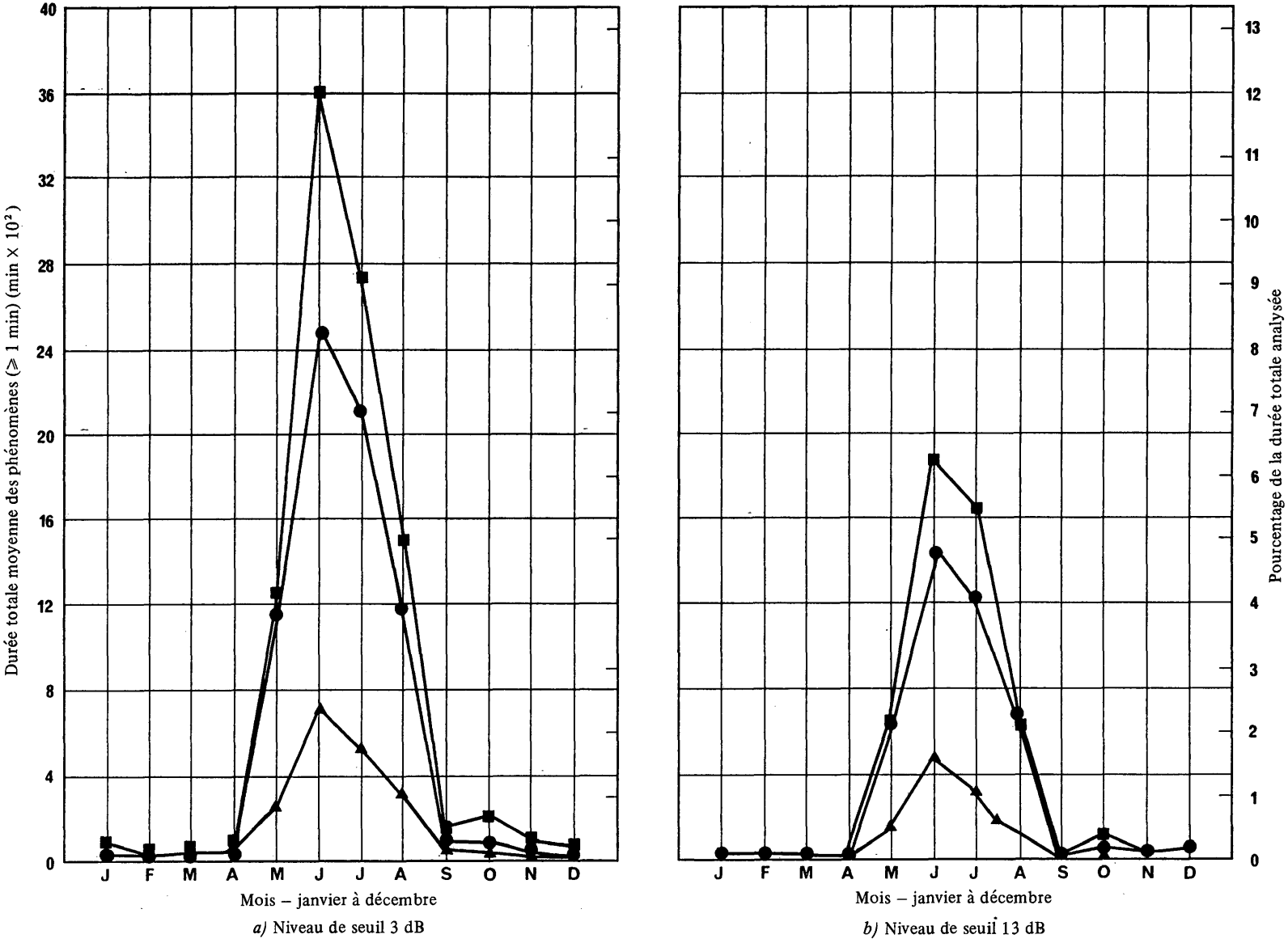
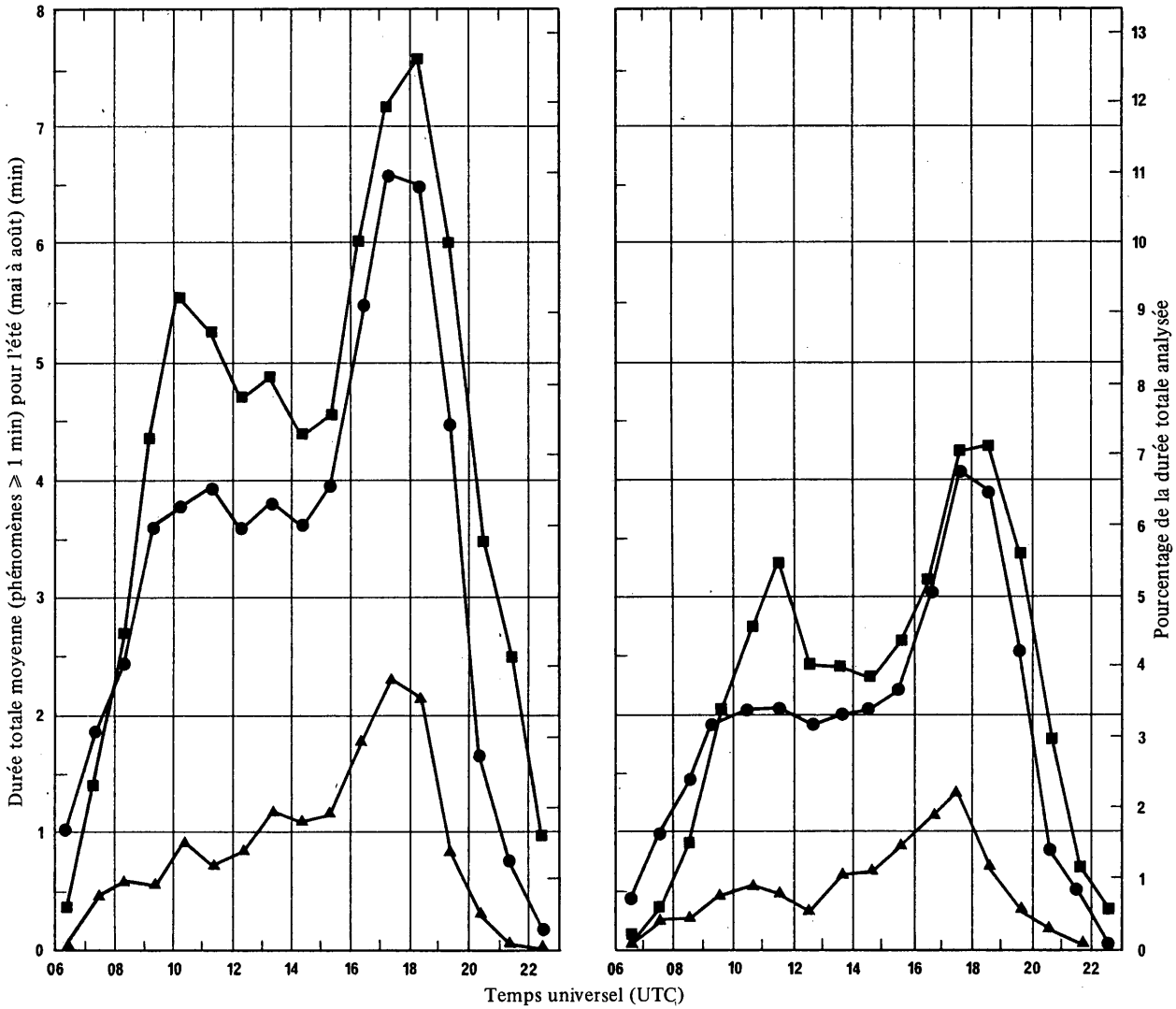


FIGURE 4 – *Variations saisonnières de la durée totale moyenne des phénomènes pour lesquels les champs dépassant 3 dB(μV/m) et 13 dB(μV/m)*

Fréquence (MHz):

● 59,25 ■ 62,25 ▲ 77,25



a) Niveau de seuil 3 dB

b) Niveau de seuil 13 dB

FIGURE 5 – *Variations diurnes de la durée totale moyenne des phénomènes pour lesquels les champs ont dépassé 3 dB(μV/m) et 13 dB(μV/m)*

Fréquence (MHz):

● 59,25

■ 62,25

▲ 77,25

Les courbes relatives aux fréquences 59,25 et 62,25 MHz présentent deux maxima, tandis que, sur la fréquence 77,25 MHz, on a un maximum unique, le soir. Il convient d'ajouter que les variations diurnes se sont révélées extrêmement variables d'un mois à l'autre.

Les distributions des durées des phénomènes qui, en période estivale, dépassent les deux niveaux de seuil pour la fréquence 62,25 MHz sont représentées sur la Fig. 6. On observe deux choses:

- les phénomènes dont la durée est la plus courte sont les plus fréquents: environ 75% des phénomènes dont le niveau dépasse 3 dB(μV/m) ont une durée inférieure à 3 min et 75% de ceux dont le niveau dépasse 13 dB(μV/m) ont une durée inférieure à 4 min;
- les phénomènes les plus marqués (dépassement du seuil de 13 dB) ont tendance à être plus longs que ceux observés au-dessus du seuil le plus bas (3 dB(μV/m)).

Des distributions semblables ont été obtenues pour les fréquences 59,25 et 77,25 MHz; elles font apparaître une légère influence de la fréquence, les phénomènes tendant à être plus brefs sur la fréquence la plus élevée. D'autres études de la durée des phénomènes ont mis en évidence des augmentations du nombre des phénomènes les plus brefs qui coincident avec des averses récurrentes de météores, ce qui indique une contribution de la propagation associée aux traînées météoriques de longue durée.

Une distribution ressemblant à celle de la Fig. 6 a été obtenue à l'issue d'une brève étude effectuée par l'UER sur trois trajets pour le mois de juin 1971. L'UER a trouvé que cette distribution est sensiblement indépendante de la longueur du trajet [UER, 1976].

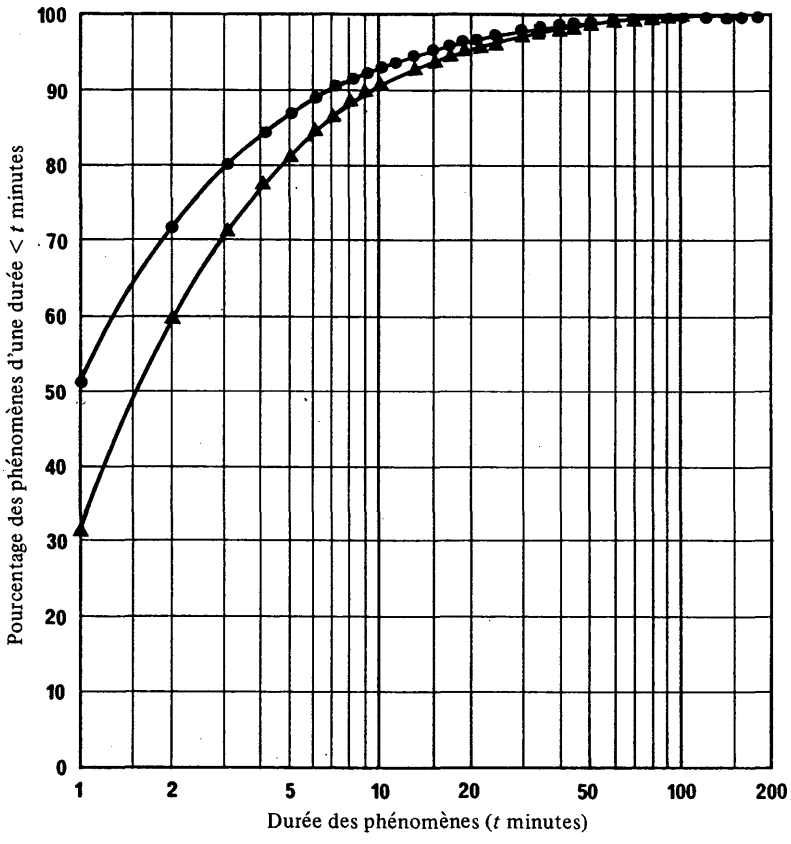


FIGURE 6 – *Distribution cumulative des phénomènes d'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de leur durée, pour les deux niveaux de seuil. Observations faites à Aberystwyth sur 62,25 MHz*

Niveau de seuil (μV/m):

● 3 dB

▲ 13 dB

Sur la Fig. 7 sont représentées, pour la fréquence 62,25 MHz, des distributions cumulatives indiquant le pourcentage de la durée totale d'occurrence de l'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de la durée de ces phénomènes. On voit bien que la durée totale de tous les phénomènes est en grande partie due à celle des phénomènes les plus longs. 75% de la durée totale sont dus à des phénomènes de plus de 5 min au niveau de référence de 3 dB(μV/m) et à des phénomènes de plus de 4 min au niveau de 13 dB(μV/m). On a obtenu des distributions semblables pour les fréquences 59,25 et 77,25 MHz.

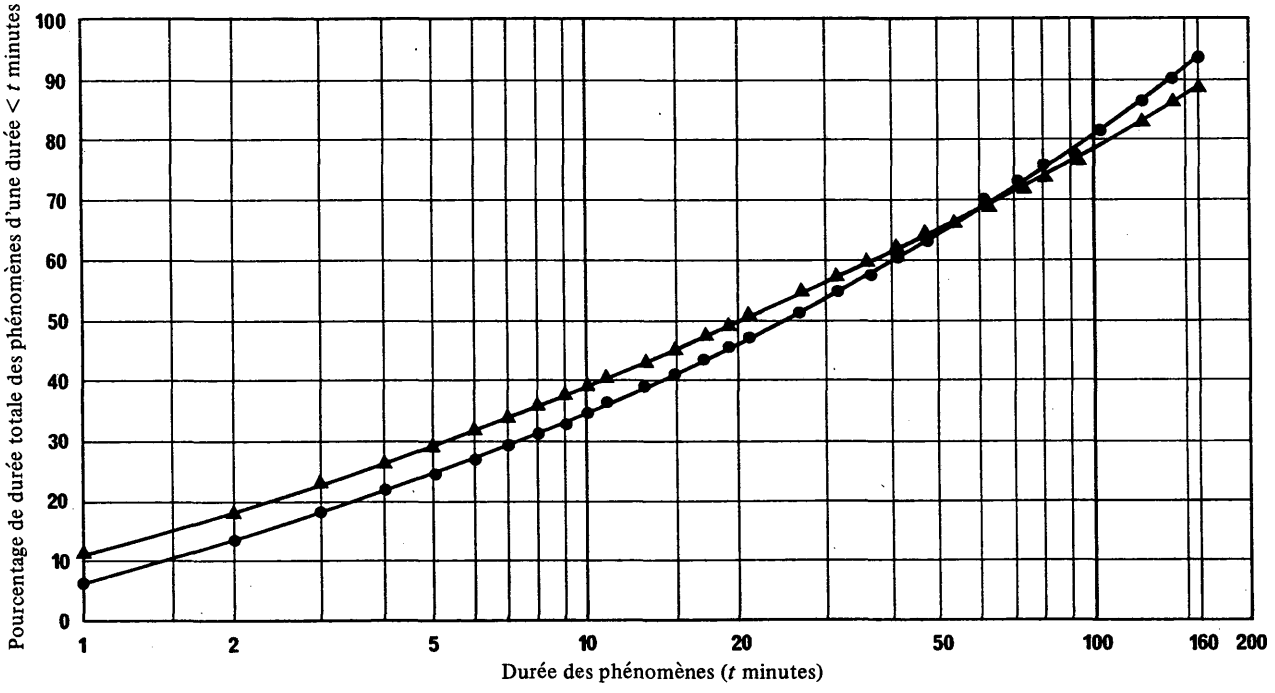


FIGURE 7 – *Pourcentage de durée cumulative des phénomènes d'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de leur durée, pour les deux niveaux de seuil. Observations faites à Aberystwyth sur 62,25 MHz*

Niveau de seuil (μV/m):

● 3 dB

▲ 13 dB

On a également étudié [Saksena, 1979] la réception en Inde de signaux de télévision dans la bande comprise entre 47 et 68 MHz. De plus, les radioamateurs portent un grand intérêt à la propagation par la couche E sporadique et il arrive souvent que des communications soient effectuées par cette couche sur des fréquences jusqu'à 144 MHz [CCIR, 1978-82].

On a observé, sur des circuits entre Guam et N.W. Cape (Australie) et entre Manille et N.W. Cape, des modes de propagation combinés dans lesquels un bond s'effectue par l'intermédiaire de la couche Es équatoriale, l'autre bond étant un bond normal, mais de grande longueur, par la couche F [McNamara, 1974a]. Pendant les heures de jour, il existe sur ces deux circuits un mode Es-F avec une MOF souvent supérieure à 32 MHz (limite supérieure du sondeur oblique) et un mode 2Es-F avec une MOF un peu plus petite. Il semble que, sur le circuit Manille-N.W. Cape, la propagation s'effectue également selon les modes normaux 2F et 3F, mais il est possible que le mode 2F n'existe pas sur le circuit Guam-N.W. Cape par suite d'occultation par Es.

2.4 *Caractéristiques de la propagation sous incidence oblique par E sporadique*

Des études faites à l'Institut Max-Planck [Möller, 1963], en utilisant des transmissions par impulsions en ondes décamétriques avec des émetteurs de diverses puissances sur un trajet de 1965 km à des latitudes moyennes indiquent que la propagation par E sporadique pourrait être sensible à la puissance. C'est ainsi qu'une variation de 10 dB de la puissance de l'émetteur pourrait entraîner une légère modification (6 à 8%) de la MOF-Es. Pendant les mois d'été, la sensibilité à la puissance semble varier selon l'heure du jour, ce qui indique qu'il existe peut-être une corrélation entre cette sensibilité et la structure physique E sporadique (voir le Rapport 255).

On a étudié en URSS la propagation en incidence oblique sur des trajets d'environ 1000 km et à des fréquences comprises entre 4,5 et 40 MHz, en effectuant des sondages au voisinage des points milieux des trajets; cette étude a permis de formuler les conclusions suivantes [Kerblaï et autres, 1973, 1979]:

- le taux d'évanouissement est faible (0,01 à 0,1 Hz) lorsque la réflexion sur E sporadique est spéculaire, mais augmente lorsqu'une diffusion commence à se manifester (0,05 à 0,4 Hz);
- la loi de la sécante (relation entre les valeurs de foEs sous incidence verticale et sous incidence oblique) donne des résultats valables en ondes décamétriques; par contre, en ondes métriques, les valeurs fournies par cette loi sont trop faibles (1,2 à 1,3 fois trop petites);
- les valeurs des effets de focalisation et de défocalisation au cours de la propagation par Es sont comprises en moyenne entre 2 et 4 dB, et entre 5 et 7 dB respectivement; dans certains cas (4% du nombre total de cas concernant la couche Es), la défocalisation atteint 10 à 13 dB.

3. Propagation par d'autres ionisations anormales

3.1 *Ionisation météorique*

Les réflexions produites par les traînées de météores ont fait l'objet d'études au Canada, en République fédérale d'Allemagne, au Royaume-Uni, aux Etats-Unis d'Amérique et dans d'autres pays. On trouvera une bibliographie sur ce sujet dans le Rapport 251.

3.2 *Propagation transéquatoriale*

Des études récentes montrent que des transmissions peuvent se faire avec des niveaux élevés, notamment pendant les années de forte activité solaire, sur les trajets longs nord-sud franchissant l'équateur magnétique. La plupart des observations ont été faites par des amateurs sur une fréquence de 50 MHz et pour des trajets de l'ordre de 4000 à 9000 km; des résultats ont été obtenus pour des trajets Amérique du Nord-Amérique du Sud, Afrique-Europe et Japon-Australie.

D'après l'expérience réalisée entre l'Australie et le Japon pendant environ un cycle d'activité solaire (1965-1974) aux fréquences 32, 48 et 72 MHz, et pendant un demi-cycle d'activité solaire (1969-1974) aux fréquences 88 et 102 MHz, on a constaté que la propagation transéquatoriale s'est manifestée à la fréquence 32 MHz pendant une grande partie de la journée (exception faite de quelques heures de la matinée) et ce, même pendant les années de faible activité solaire. Les heures de réception ont augmenté en fonction de l'activité solaire. Aux fréquences 48, 72, 88 et 102 MHz, la propagation transéquatoriale s'est manifestée après 2000 heure locale environ pendant les périodes d'équinoxe et a duré 6 à 8 heures à 48 MHz, et 2 à 4 heures à 102 MHz. Les variations à long terme des affaiblissements de transmission fondamentaux en ondes métriques qui se sont propagées sur le trajet transéquatorial sont indiquées sur la Fig. 5 [Tao et autres, 1970; Kuriki et autres, 1972; Tanohata et autres, 1980]. Sur la base des niveaux de signal observés sur les quatre fréquences, la puissance du signal reçu, normalisée à une p.a.r. de 1 kW et en utilisant des doublets à l'émission et à la réception, est inversement proportionnelle à une valeur comprise entre la puissance 10 et la puissance 12 de la fréquence [Kuriki et autres, 1972].

Il semble que la propagation de jour s'effectue selon le mode 2F par suite de l'anomalie équatoriale, et que, la nuit, le signal qui manifeste des évanouissements rapides et peu profonds soit dû à un processus de diffusion lié au phénomène F-diffus équatorial [Tao et autres, 1970].

Il semble qu'il existe deux types de propagation transéquatoriale, caractérisés par les heures d'occurrence, les caractéristiques des évanouissements et les modes de propagation. Des études générales de la propagation transéquatoriale ont été faites par McCue et Fyfe [1965] et par Nielson et Crochet [1974].

Le premier type de propagation transéquatoriale, appelé le type de l'après-midi, a les caractéristiques suivantes:

- maximum d'occurrence vers 1700-1900 h, temps local moyen, l'heure étant déterminée au point où le circuit coupe l'équateur magnétique;
- normalement, signaux forts et constants, avec un taux d'évanouissement peu élevé et un faible étalement par effet Doppler (environ ± 2-4 Hz);
- longueurs de trajet de l'ordre de 6000 à 9000 km, parfois plus.

Gibson-Wilde [1969] a suggéré que, dans la zone de l'Australasie au moins, ces signaux se propagent probablement selon le «supermode» ou mode FF proposé par Villard et autres [1957]. Cette propagation s'effectue avec deux réflexions sur la couche F, sans réflexion intermédiaire au sol.

Le deuxième type de propagation transéquatoriale, appelé le type du soir, fait généralement intervenir des fréquences plus élevées que le type de l'après-midi et possède des caractéristiques très différentes:

- une crête d'occurrence vers 2000-2300 h, temps local moyen;
- signaux forts, mais subissant des évanouissements profonds et rapides dont la période peut atteindre environ 15 Hz et avec un grand étalement par effet Doppler qui dépasse parfois 40 Hz;
- longueurs de trajet plus petites que pour le type de l'après-midi, de l'ordre de 3000 à 6000 km.

On ne connaît pas encore avec certitude le type de propagation transéquatoriale du type de l'après-midi. Différents mécanismes ont été proposés pour l'expliquer. On trouvera des détails dans plusieurs publications [Bowen et autres, 1968; Tao et autres, 1970; Kuriki et autres, 1972; McNamara, 1973; Heron et McNamara, 1979; Winkler, 1981; Ferguson et Booker, 1983].

3.3 *Ionisation d'autres natures*

Les études montrent qu'il peut se trouver, par moments, des îlots d'ionisation situés à des hauteurs autres que celles de toutes les couches ionosphériques reconnues. Ces irrégularités d'ionisation peuvent parfois réfléchir des ondes de fréquence situées dans la gamme de 30 à 300 MHz, le cas le plus typique étant celui où la réflexion se produit sur les bords d'irrégularités d'ionisation alignées sur le champ magnétique, ce qui a lieu dans la zone aurorale ou à proximité de cette zone. Des réflexions de ce genre peuvent constituer une cause de brouillage pour des stations fonctionnant sur des fréquences comprises entre 30 et 300 MHz [Czechowsky, 1970].

Des réflexions par la région F ont été observées sur des fréquences sensiblement supérieures à la MUF de référence F2, mais avec des niveaux bien inférieurs à ceux qui correspondent à l'espace libre. Ces réflexions ont été observées en Extrême-Orient, en Amérique du Sud et en Afrique. Il s'agit, semble-t-il, d'un phénomène caractéristique des années d'intense activité solaire, se produisant de préférence pendant les mois d'équinoxe [Bateman et autres, 1959].

On a observé des MOF renforcées la nuit sur les circuits Guam-N.W. Cape (Australie) et Manille-N.W. Cape pendant les mois d'équinoxe, en période de grande activité solaire. Ces MOF dépassent la 2F MOF; elles dépassent aussi souvent 32 MHz, limite supérieure des appareils. McNamara [1974b] les a expliquées en invoquant un mode de propagation par deux bonds. On en a conclu que pour le premier bond la propagation s'effectue par diffusion à partir des irrégularités alignées sur les lignes de force du champ. On admet que la longueur du premier bond est inférieure à la moitié de la longueur totale du circuit; quant au deuxième bond, il s'effectue sur la couche F et sa MUF est plus élevée que celle du deuxième bond d'un mode 2F normal.

Des résultats obtenus sur un trajet subéquatorial de 1985 km (est-ouest) entre Sao Paulo (Brésil) et Tucuman (Argentine) pour la transmission à 59,75 MHz (son de télévision), une puissance équivalente de l'émetteur dans le sens réception de 9 kW, un gain d'antenne à la réception de 6 dB (polarisation horizontale, hauteur de 14 m) [Moro, 1984] mettent en évidence les caractéristiques suivantes:

- grand pourcentage d'occurrence pendant la nuit (2000-0100 h, temps local);
- pour des champs supérieurs à 5 μV/m, l'apparition est normalement distribuée avec un maximum (70 h par mois) à la fin du printemps et un minimum (1 h par mois) à la fin de l'automne;
- pour la période printemps-été, on a relevé pendant 60% des jours des contacts d'une durée de 2½ h pour des champs égaux ou supérieurs à 5 μV/m;
- le pourcentage des heures-mois diminue très rapidement quand le champ augmente, passant d'un maximum à la fin du printemps à deux maxima au début du printemps et au début de l'automne (septembre et mars) pour des champs supérieurs à 10 μV/m. La Fig. 9 récapitule le nombre observé d'heures-mois de réception en fonction du mois et de la valeur du champ.

3.4 *Diffusion latérale au sol et dans l'ionosphère*

On a observé que les azimuts d'arrivée des ondes métriques qui se propagent par l'ionosphère diffèrent notablement de ceux des ondes qui se propagent le long du grand cercle. Ces signaux résultent principalement de modes de propagation à bonds multiples où la diffusion latérale est due aux irrégularités à la surface de la Terre (Rapport 726). Les niveaux des signaux sont bien inférieurs à ce qu'ils seraient après une propagation en espace libre et ils ont des périodes d'évanouissements de moins d'un Hertz.

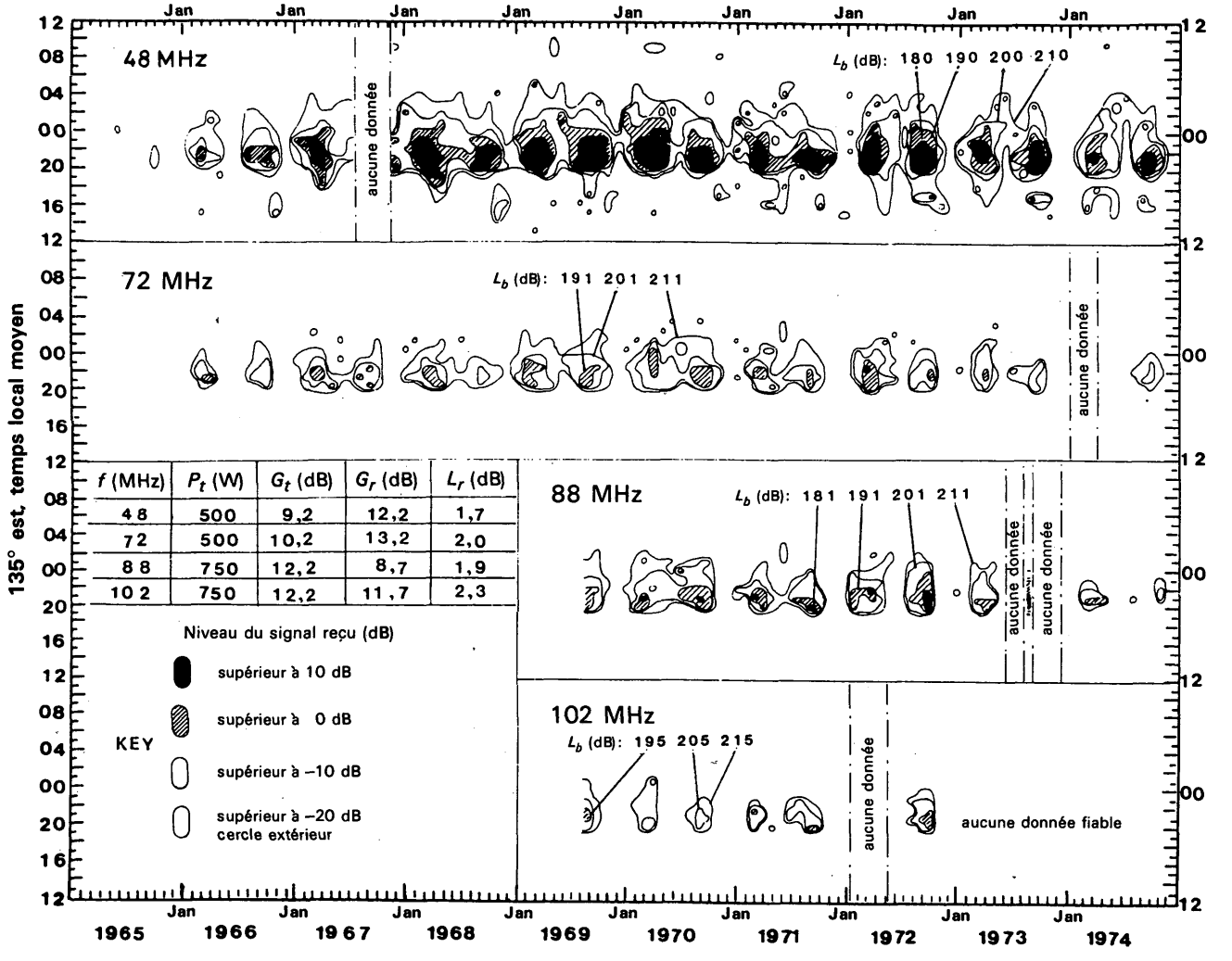


FIGURE 8 – *Affaiblissements de transmission de référence (L_b) et champs reçus (V_r) indiqués par la tension d'une antenne de circuit ouvert*

P_t: puissance de l'émetteur
G_t: gain de l'antenne d'émission
G_r: gain de l'antenne de réception
L_r: affaiblissement des lignes d'alimentation de réception

Le champ reçu est donné en dB(1 μV).

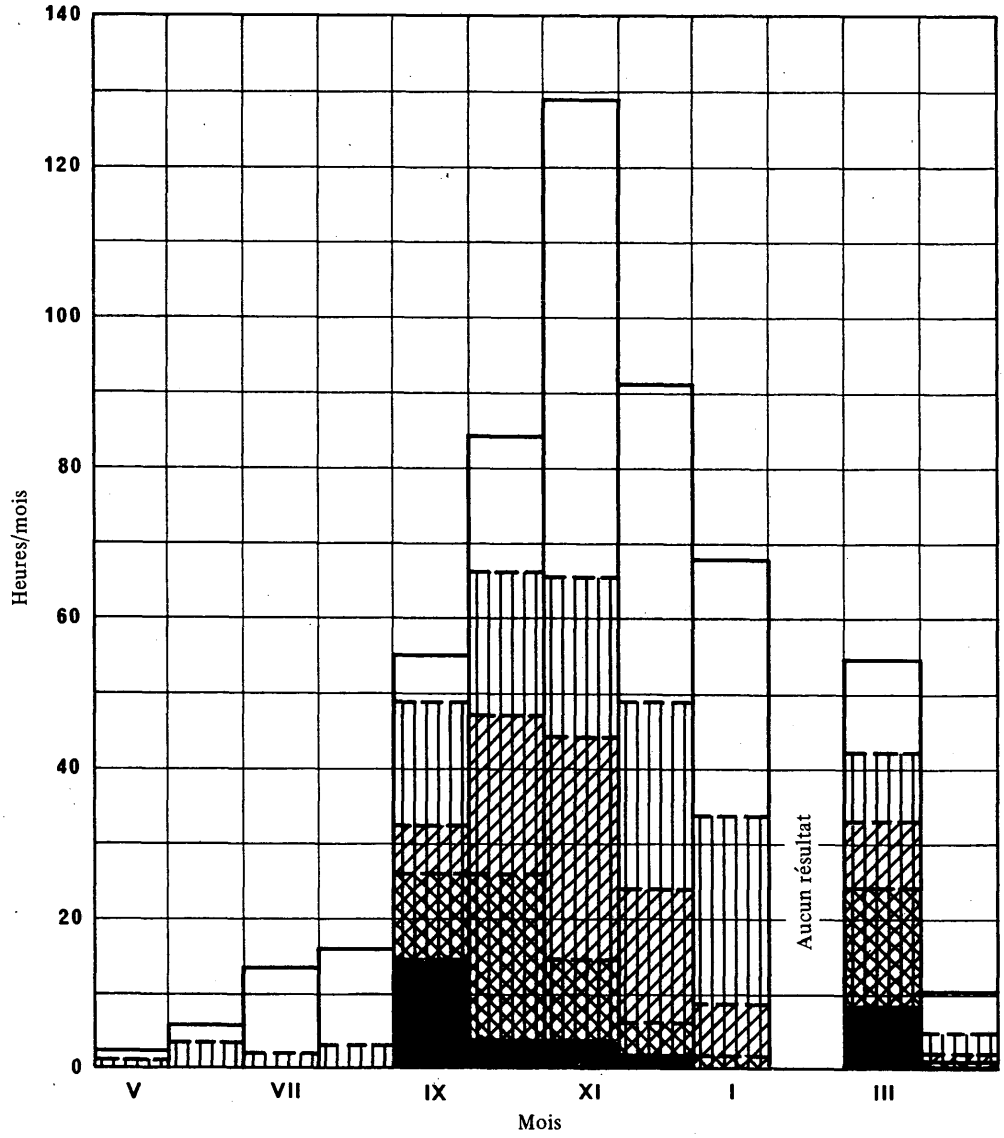


FIGURE 9 – *Nombre cumulé d'heures par mois pour une valeur donnée du champ (1980-1981)*

$E \geqslant 2\ \mu V/m$

$E \geqslant 5\ \mu V/m$

$E \geqslant 10\ \mu V/m$

$E \geqslant 20\ \mu V/m$

$E \geqslant 50\ \mu V/m$

Les chiffres romains indiquent le numéro des mois (I = janvier)

Puissance efficace rayonnée dans la direction du récepteur: 9 kW

4. Tableau des principales causes de brouillage pour les stations travaillant sur des fréquences de 30 à 300 MHz

Origine des brouillages	Zone de latitudes	Période où les brouillages sont intenses	Valeur aproximative (MHz) de la fréquence la plus haute affectée d'un brouillage intense	Valeur approximative (MHz) de la fréquence au-dessus de laquelle le brouillage est négligeable	Distances approximatives entre lesquelles les brouillages se font sentir (km)
Réflexions par la couche F normale	Latitudes moyennes	Jour, équinoxe et hiver, activité solaire maximale	50	60	Trajets E-O 3000-6000 ou trajets N-S 3000-10 000
	Latitudes basses	Entre l'après-midi et la fin de la soirée, activité solaire maximale	60	70	
Réflexions par l'ionisation E sporadique	Aurorales	Nuit	70	90	500-4000
	Latitudes moyennes	Jour et soir — Eté	60	83-135 (1)	
	Equatoriales	Jour	60	90	
Diffusion par E sporadique	Latitudes basses	Soir jusqu'à minuit	60	90	Jusqu'à 2000
Réflexions par l'ionisation météorique	Toutes latitudes	Surtout pendant les averses météoriques	Peut être importante sur n'importe quelle fréquence de la gamme		Jusqu'à 2000
Réflexions sur des colonnes d'ionisation aurorale alignées sur le champ magnétique	Aurorales	Fin de soirée et nuit			
Diffusion dans la région F	Latitudes basses	Soir, jusqu'à minuit, équinoxe	60	80	1000-4000
Effets spéciaux de propagation transéquatoriale	Latitudes basses	Soir, jusqu'à minuit	60	80	4000-9000

(1) Pour 0,1 % du temps, pendant les heures comprises entre 08 h 00 et 23 h 00 (heure locale), de mai à août (111 min au total), on peut déduire de l'Annexe I à la Recommandation 534 les fréquences suivantes, pour une distance de 1800 km et pour $\Gamma = 30$ dB aux latitudes moyennes:

Région A (Europe et Afrique du Nord)	83 MHz
Région B (Amérique du Nord)	93 MHz
Région C (Asie)	135 MHz
Région D (Moyenne pour l'hémisphère nord)	115 MHz

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BATEMAN, R., FINNEY, J. W., SMITH, E. K., TVETEN, L. H. et WATTS, J. M. [1959] IGY observations of F-layer scatter in the Far East, *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, 403-405.

BOWEN, E. D., FAY, W. J. et HERITAGE, J. L. [1968] VHF characteristics of the transequatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.* Vol. 73, 2469-2476.

CANIVENC, S. [1975] Analysis of the VHF long-distance sporadic-E opening of 4 July 1965. Technical Propagation Report No. IARU/SEPN-01*.

CANIVENC, S. [1977] Analysis of the VHF long-distance sporadic-E opening of 24 May 1971. Technical Propagation Report No. IARU/SEPN-02*.

CANIVENC, S. [1979] Analysis of the VHF long-distance sporadic-E opening of 9 July 1974. Technical Propagation Report No. IARU/SEPN-03*.

CANIVENC, S. [1983] 144 MHz field-aligned scatter propagation in the European area – a preliminary report. Technical Propagation Report No. IARU/SEPN-04*

CANIVENC, S. [1985] An eight-year correlation study between midlatitude intense sporadic-E and magnetic activity in the European area. Technical Propagation Report No. IARU/SEPN-05*.

CZECHOWSKY, P. [1970] Berechnung eines Stromsystems in der polaren E-Region (Calcul d'un système de courant dans la région E polaire). *Z. für Geophysik*, Vol. 36, 647-650.

DAVIS, R. M., SMITH, E. K. et ELLYETT, C. D. [1959] Sporadic E at VHF in the USA *Proc. IRE*, Vol. 47, 762-769.

EDWARDS, K. J., KERSLEY, L. et SHRUBSOLE, L. F. [1983] Interference from sporadic-E propagation at frequencies around 70 MHz. IEE Conf. Publ. No. 219, Partie 2, 321-324. IEE Third International Conference on Antennas and Propagation (ICAP' 83), University of East Anglia, Royaume-Uni.

FERGUSON, J. A. et BOOKER, H. G. [1983] A scattering theory of VHF transequatorial propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 641-657.

GIBSON-WILDE, B. C. [1969] Relation between the equatorial anomaly and transequatorial VHF radio propagation. *Radio Sci.*, Vol 4, 797-802.

GIRÁLDEZ, A. E. [1980] Equatorial belt sporadic-E statistics, LIARA C-30. Laboratorio Ionosférico de la Armada, República Argentina.

HERON, M. L. et McNAMARA, L. F. [1979] Transequatorial VHF propagation through equatorial plasma bubbles. *Radio Sci.*, Vol 14, 897-910.

HUNSUCKER, R. D. [1975] Chatanika radar investigation of high latitude E-region ionization structure and dynamics, *Radio Sci.*, Vol. 10, 277-288.

HUNSUCKER, R. D. [1979] Morphology and phenomenology of the high-latitude E- and F-regions, *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, Vol. II, Working Group Reports and Reviews, 543-561 Ed. R. F. Donnelly, US Dept. of Commerce US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.

KERBLAÏ, T. S. et KISHCHA, P. V. [1985] Calculation of the horizontal Es layer inhomogeneity and its effects on radio wave field attenuation. *Geomag. i Aeronom.*, 3, 495-497.

KERBLAÏ, T. S., MINULLIN, R. G., MAKARENKO, S. F., NASYROV, A. M., NASYROV, G. N., NOSOVA, G. N. et PODOLSKAYA, T. Y. [1979] Angles d'azimuth des ondes radioélectriques réfléchies sur la couche Es. Dans le volume intitulé *Questions concernant la propagation des ondes radioélectriques aux latitudes hautes et moyennes*, 71-77 (en russe), IZMIRAN, Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.

KERBLAÏ, T. S., NOSOVA, G. N., MINULLIN, R. G. et KURGANOV, R. A. [1973] Periody fluktuatsii signalov s chastotoi 27.8 MGts. otrazhennykh ot intensivnykh sloev Es (Les périodes de fluctuations des signaux de 27,8 MHz réfléchies sur les couches Es intenses). Collection d'articles «*Questions concernant la propagation en ondes décamétriques*». IZMIRAN. Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.

KURIKI, I., TANOHATA, K., SAKAMOTO, T. et IGUCHI, M. [1972] Propagational mode deduced from signal strength in the VHF band of the trans-equatorial path, *J. of Radio Res, Labs.* (Japon), Vol. 19, 175-195.

LARI, G., TAGHOLM, L. F. et BELL, C. P. [1967] Etude de la propagation ionosphérique des ondes métriques (Bande I). Techn. 3085-F. Centre technique de l'UER, 32, Avenue Albert-Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.

McCUE, C. G. et FYFE, D. F. [1965] Transequatorial propagation. Task Bridger introductory review. *Proc. IREE* (Australie), Vol 26, 825-835.

McNAMARA, L. F. [1973] Evening-type transequatorial propagation on Japan-Australia circuits. *Austral. J. Phys.*, Vol. 26, 521-543.

McNAMARA, L. F. [1974a] Sporadic E propagation modes on transequatorial circuits. Report IPS-R25, Ionospheric Prediction Services, Sydney, Australie.

* Ces cinq rapports peuvent être obtenus à l'adresse suivante: Dr. John Allaway, Secretary IARU, 10 Knightlow Road, Birmingham, B17 8QB, Royaume-Uni.

McNAMARA, L. F. [1974b] Unusual night-time propagation modes on the Guam and Manila-N.W. Cape Circuits. Report IPS-R27 Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

MIYA, K. et SASAKI, T. [1966] Characteristics of ionospheric Es propagation and calculation of Es signal strength. *Radio Sci.*, Vol. 1 (nouvelle série), 99-108.

MIYA, K., SHIMIZU, K. et KOJIMA, T. [1978] Oblique incidence sporadic-E propagation and its ionospheric attenuation. *Radio Sci.*, Vol. 13, **3**, 559-570.

MÖLLER, H. G. [1963] Impulsübertragungsversuche mit schräger Inzidenz und veränderlicher Frequenz über Entfernungen zwischen 1000 km und 2000 km (Essais d'émission d'impulsions sous incidence oblique et sur une fréquence variable effectués sur une distance comprise entre 1000 et 2000 km). *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen* Nr. 1149.

MORO, E. S. M. [1984] Anomalous VHF Propagation. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984.* SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.

NIELSON, D. L. et CROCHET, M. [1974] Ionospheric propagation of HF and VHF radio waves across the geomagnetic equator. *Rev. Geophys.*, Vol 12, 688.

REINISCH, B. [1965] Die Bedeutung von Echos an der sporadischen E-Schicht bei Impulsfernübertragung über 1700 km (Athen-Breisach) (L'importance des échos de la couche E sporadique dans les transmissions par impulsions sur une distance de 1700 km) (Athènes-Brisach). *AEÜ*, Vol. 19, 361-366.

SAKSENA, R. C. [1979] Anomalous long distance TV reception at Delhi. Indian J. Radio and Space Phys., Vol. 8, 351-356.

STEVENS, E. E. [1968] The significance of sporadic-E propagation in determining the MUF. *Ionospheric Radio Communications*, 289-293 Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.

TANOHATA, K., KURIKI, I., IGUCHI, M., YAMASHITA, K. et SAKAMOTO, T. [1980] The results of long-term experiment of transequatorial VHF wave propagation, *Rev. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 26, 885-897.

TAO, K., OCHI, F., YAMAOKA, M., WATANABE, S., WATANABE, C. et TANOHATA, K. [1970] Experimental results on VHF transequatorial propagation. *J. of Radio Res. Labs.* (Tokyo), Vol. 17, 83-101.

UER, [1976] Ionospheric propagation in Europe in VHF television band I, UER Document technique TECH 3214, Volumes I et II, Centre technique, 32, Avenue Albert-Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.

VILLARD, D. G. Jr., STEIN, S. et YEH, K. C. [1957] Studies of transequatorial ionospheric propagation by the scatter-sounding method. *J. Geophys. Res.*, Vol 62, 399-412.

WAGNER, R. A., SNYDEP, A. L. et AKASOFU, S. I. [1973] The structure of the polar ionosphere during exceptionally quiet periods. *Planet. Space Sci.*, Vol. 21, 1911-1922.

WILSON, C. R., HUNSUCKER, R. D. et ROMICK, G. J. [1976] An auroral infrasonic substorm investigation using Chatanika radar and other geophysical sensors, *Planet. and Space Sci.*, Vol. 24, 1155-1175.

WINKLER, C. [1981] Radio wave guidance at VHF through equatorial plasma bubbles. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 43, 307-316.

WRIGHT, J. W. et HUNSUCKER, R. D. [1983] Estimation of turbulent energy dissipation, winds and ionospheric structure from dynasonde measurements, *Radio Sci.*, Vol. 18, 988-994.

Documents du CCIR

[1974-78]: 6/251 (URSS).

[1978-82]: 6/74 (GTI 6/8).

[1982-86]: 6/231 (Inde).

BIBLIOGRAPHIE

BAILEY, D. K. [1962] Ionospheric forward-scattering. *Monograph on ionospheric radio*, 189-199. Ed. W. J. G. Beynon, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.

COLLINS, C. et FORSYTHE, P. A. [1959] A bistatic radio investigation of auroral ionization. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 13, 315-345.

DIEMINGER, W., ROSE, G. et WIDDEL, H. U. [1963] Probabilité de brouillages dans une même voie, causés en Afrique, dans les bandes I, II et III par la diffusion et la réflexion sur les couches E et F. *J. des Télécomm.*, Vol. 30, 251-256.

SECTION 6P: CHAMP AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 1,6 MHz

Recommandation et Rapports

RECOMMANDATION 435-5 *

PRÉVISION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 150 ET 1600 kHz

(Programme d'études 31D/6)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il est nécessaire de fournir des indications aux ingénieurs chargés des plans relatifs aux services de radiodiffusion dans les bandes 5 et 6 (bandes des ondes kilométriques et hectométriques);

b) qu'il est important de déterminer la distance géographique minimale entre les stations travaillant dans les mêmes canaux ou dans des canaux adjacents afin d'éviter les brouillages occasionnés par la propagation ionosphérique à grande distance;

c) que la méthode exposée dans l'Annexe I est fondée sur des analyses statistiques de mesures de champ effectuées sur 266 trajets répartis dans le monde entier et complétées par le résultat d'analyses correspondant à des régions géographiques pour lesquelles on ne dispose pas de données sur des trajets individuels,

RECOMMANDE

que la méthode figurant dans l'Annexe I soit adoptée pour être utilisée provisoirement, tout en notant les réserves faites sur sa précision quand elle est appliquée dans certaines régions précisées dans ladite Annexe.

ANNEXE I

MÉTHODE DE PRÉVISION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE POUR LES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 150 ET 1600 kHz

Symboles

A : paramètre défini au § 2

b : facteur d'activité solaire indiqué au § 2.6

d : distance mesurée à la surface du sol entre l'émetteur et le récepteur (km)

E : valeur médiane annuelle du champ pour une force cymomotrice donnée V et à une heure donnée t comptée à partir du coucher ou du lever du Soleil suivant le cas

E_0 : valeur médiane annuelle du champ à l'heure de référence indiquée au § 2 (dB(μV/m))

f : fréquence (kHz)

G_0 : gain correspondant à une extrémité située sur la côte (dB)

G_H : gain de l'antenne d'émission dû à la directivité horizontale (dB)

G_S : gain correspondant à une extrémité située près de la mer (dB)

G_V : gain de l'antenne d'émission dû à la directivité verticale (dB)

h : hauteur de l'antenne d'émission (Fig. 1)

I : inclinaison magnétique, N ou S (degrés)

k, k_R : coefficients d'affaiblissement (§ 2.6)

L_p : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation (dB)

L_t : coefficient d'affaiblissement horaire (dB)

P : puissance rayonnée (dB(1 kW))

p : longueur du chemin parcouru par l'onde (km)

Q_1, Q_2 : facteurs intervenant dans le calcul du gain dû à la proximité de la mer (§ 2.3)

R : moyenne glissante sur douze mois du nombre relatif international de taches solaires

r_1, r_2 : paramètres définis au § 2.3

---

* L'Administration de la République populaire de Chine réserve son opinion sur cette Recommandation.

s_1 : distance entre une extrémité et la mer, comptée le long du grand cercle (km)

s_2 : distance entre une extrémité et la portion terrestre suivante, comptée le long du grand cercle (km)

t : nombre d'heures après le coucher ou avant le lever du Soleil

V : force cymomotrice de l'émetteur (dB(300 V))

θ : angle entre la direction de propagation et la direction magnétique est-ouest (degrés)

λ : longueur d'onde

Φ : paramètre de latitude géomagnétique

Φ_T : latitude géomagnétique de l'émetteur

Φ_R : latitude géomagnétique du récepteur

(en degrés), valeurs positives dans l'hémisphère Nord et négatives dans l'hémisphère Sud

1. Introduction

La méthode de prévision ci-après permet d'évaluer le champ de l'onde ionosphérique produit de nuit par une antenne verticale simple ou composée rayonnant une puissance donnée, les mesures étant faites au niveau du sol, au moyen d'un cadre dont le plan vertical coïncide avec le plan du grand cercle qui contient la direction de l'émetteur. Cette méthode peut être utilisée pour des trajets d'une longueur allant jusqu'à 12 000 km dans les bandes 5 (ondes kilométriques) et 6 (ondes hectométriques)*. Dans la bande 5 cependant, ces résultats n'ont encore été vérifiés que pour des distances inférieures à 5000 km. L'exactitude des prévisions varie d'une région à l'autre; on peut, dans certaines régions, l'améliorer en apportant à la méthode des modifications telles que celles indiquées au § 6 ci-après. De toutes façons, cette méthode ne doit être utilisée qu'avec une certaine prudence aux latitudes géomagnétiques supérieures à 60°.

Les Fig. 1, 2 et 3 constituent un élément essentiel de la méthode de prévision. Pour plus de commodité, on a inclus des cartes géomagnétiques (Fig. 11, 12 et 16). Les autres figures (Fig. 4 à 10, 13 à 15 et 17) et l'Appendice I de l'Annexe I contiennent des données supplémentaires qui permettent de simplifier l'application de la méthode.

2. Valeur médiane annuelle du champ de nuit

Le champ prévu de l'onde ionosphérique est donné par la formule:

$$E = V + E_0 - L_t = V + G_S - L_p + A - 20 \log p - 10^{-3} k_R p - L_t \quad (1)$$

dans laquelle:

E : valeur médiane annuelle des médianes semi-horaires du champ, en dB(μV/m), pour une force cymomotrice d'émission donnée V, et à une heure donnée t comptée à partir du coucher ou du lever du Soleil suivant le cas,

E_0 : valeur médiane annuelle des médianes semi-horaires du champ, en dB(μV/m), pour une force cymomotrice d'émission de 300 V, à l'heure de référence indiquée au § 2.1,

V : force cymomotrice de l'émetteur, en dB par rapport à une force cymomotrice de référence de 300 V, (voir § 2.2),

G_S : correction du gain dû à la proximité de la mer, en dB, (voir § 2.3),

L_p : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, en dB (voir § 2.4),

A : 106,6 − 2 sin Φ, Φ étant donné par la formule (12),

p : longueur du chemin parcouru par l'onde, en km, (voir § 2.5),

k_R : coefficient d'affaiblissement tenant compte de l'absorption ionosphérique, de la focalisation et des affaiblissements aux extrémités et entre bonds dans le cas des trajets à plusieurs bonds (voir § 2.6),

L_t : coefficient d'affaiblissement horaire en dB (voir § 2.7).

Pour faciliter les calculs, la Fig. 4 donne la quantité $A - 20 \log p$ pour $\Phi = 40°$, en fonction de la distance d à la surface du sol, tandis que les Fig. 5 à 10 donnent E_0 en fonction de la distance d à la surface du sol pour diverses valeurs de fréquences et pour diverses valeurs de latitude géomagnétique où G_S, L_p et R sont tous égaux à zéro.

2.1 *Heure de référence*

On prend pour heure de référence six heures après le coucher du Soleil en un point S de la surface de la Terre. Pour les trajets inférieurs à 2000 km, S est le point milieu du trajet. Pour les trajets plus longs, S est situé à 750 km de l'extrémité où le Soleil se couche en dernier, cette distance étant comptée le long du grand cercle. La relation entre la distance au sol et les coordonnées géographiques des points sur le trajet est donnée dans le Rapport 252.

* La bande 5 couvre la gamme de fréquences comprise entre 150 et 285 kHz environ et la bande 6, la gamme de fréquences comprise entre 520 et 1600 kHz environ.

2.2 *Force cymomotrice*

La force cymomotrice V est donnée par la formule:

$$V = P + G_V + G_H \tag{2}$$

dans laquelle:

P: puissance rayonnée, en dB(1 kW),

G_V: gain de l'antenne d'émission dû à la directivité verticale, en dB (voir la Fig. 1),

G_H: gain de l'antenne d'émission dû à la directivité horizontale, en dB. Pour les antennes directives, G_H est fonction de l'azimut. Pour les antennes omnidirectives, $G_H = 0$.

2.3 *Gain dû à la proximité de la mer*

G_S est le gain supplémentaire qui se manifeste lorsque l'une ou l'autre des extrémités du trajet (ou les deux) sont situées près de la mer; il ne s'applique pas dans le cas de la propagation au-dessus de l'eau douce. Si une seule des deux extrémités est située près de la mer:

$$G_S = G_0 - c_1 - c_2 \quad \text{si} \quad (c_1 + c_2) < G_0 \tag{3}$$

$$G_S = 0 \quad \text{si} \quad (c_1 + c_2) \geqslant G_0 \tag{4}$$

Dans ces formules:

G_0: gain dans le cas où l'extrémité est située sur la côte et où la mer n'est pas occultée par un autre segment terrestre,

c_1: correction destinée à tenir compte de la distance entre l'extrémité et la mer,

c_2: correction destinée à tenir compte de la largeur d'un ou plusieurs bras de mer ou de la présence d'îles.

Si les extrémités du trajet sont toutes deux situées près de la mer, G_S est la somme des valeurs pour chacune d'elles.

G_0 est donné, sur la Fig. 2, en fonction de d pour les bandes 5 et 6. Dans la bande 6, $G_0 = 10$ dB lorsque d est supérieur à 6500 km.

Le facteur de correction c_1 est donné par:

$$c_1 = \frac{s_1}{r_1} G_0 \tag{5}$$

formule dans laquelle:

s_1: distance de l'extrémité à la mer, mesurée le long de l'arc de grand cercle (km),

$r_1 = 10^3 \, G_0^2 / Q_1 f$ (km),

f: fréquence (kHz),

$Q_1 = 0{,}30$ dans la bande 5 et 1,4 dans la bande 6.

Le facteur de correction c_2 est donné par:

$$c_2 = \alpha \, G_0 \left(1 - \frac{s_2}{r_2}\right) \quad \text{si} \quad s_2 < r_2 \tag{6}$$

$$c_2 = 0 \quad \text{si} \quad s_2 \geqslant r_2 \tag{7}$$

où:

s_2: distance de l'extrémité à la section terrestre suivante, mesurée le long de l'arc de grand cercle, en km,

$r_2 = 10^3 \, G_0^2 / Q_2 f$ (km),

$Q_2 = 0{,}25$ dans la bande 5 et 1,2 dans la bande 6,

α: proportion de terre dans la section du trajet comprise entre r_2 et s_2 ($0 < \alpha \leqslant 1$).

Lorsqu'on effectue ces calculs à l'aide d'un ordinateur et que l'on ne dispose pas d'une banque de données de terrain permettant de calculer le pourcentage α dans la formule (6), on peut poser $\alpha = 1/2$, ce qui revient à supposer une répartition terre/mer de 50% dans la section du trajet comprise entre r_2 et s_2.

Pour faciliter les calculs, on a tracé la Fig. 14a qui représente r_1, distance maximale à la mer pour laquelle il y a lieu de calculer le gain dû à la mer, et la Fig. 14b qui représente r_2, distance maximale à la prochaine section de terre pour laquelle il y a lieu d'appliquer la correction c_2. Ces deux figures ont été tracées pour diverses valeurs de la fréquence.

2.4 *Affaiblissement par couplage de polarisation*

L_p est le surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation. Dans la bande 5, $L_p = 0$. Dans la bande 6, L_p est donné à chaque extrémité par l'une des deux formules suivantes:

$$L_p = 180\,(36 + \theta^2 + I^2)^{-1/2} - 2 \quad \text{dB} \quad \text{si } I \leqslant 45° \qquad (8)$$
$$L_p = 0 \quad \text{si } I > 45°$$

où I est l'inclinaison magnétique N ou S en degrés à l'extrémité et θ l'azimut du trajet mesuré en degrés par rapport à la direction magnétique est-ouest, de telle sorte que $|\theta|$ soit inférieur ou égal à 90°. L_p doit être évalué séparément pour les deux extrémités car θ et I peuvent y avoir des valeurs différentes; les deux valeurs de L_p sont ensuite additionnées. Pour θ et I, il convient d'utiliser les valeurs les plus précises de l'inclinaison et de la déclinaison magnétique dont on dispose. (Voir par exemple les Fig. 11 et 12.)

La Fig. 13 représente les valeurs de L_p calculées d'après la formule (8).

2.5 *Longueur du trajet parcouru par l'onde*

Pour les trajets d'une longueur supérieure à 1000 km, p est sensiblement égal à la distance au sol d. Pour les trajets plus courts,

$$p = (d^2 + 40\,000)^{1/2} \qquad (9)$$

La formule (9) peut être utilisée avec une erreur négligeable pour n'importe quelle distance. Afin d'éviter toute discontinuité du champ en fonction de la distance, cette formule devra être utilisée dans tous les cas où la gamme des distances concernée comporte des distances inférieures à 1000 km et des distances supérieures à 1000 km.

2.6 *Coefficients d'affaiblissement*

Le coefficient d'affaiblissement k_R est donné par:

$$k_R = k + 10^{-2}\, bR \qquad (10)$$

où R est la moyenne glissante sur douze mois du nombre relatif international de taches solaires. Dans la bande 5, $b = 0$. Dans la bande 6, $b = 4$ pour les trajets situés en Amérique du Nord, $b = 1$ pour les trajets situés en Europe et en Australie et $b = 0$ partout ailleurs.

Le coefficient d'affaiblissement k est donné par:

$$k = 3{,}2 + 0{,}19\, f^{0,4}\, \mathrm{tg}^2(\Phi + 3) \qquad (11)$$

où f est la fréquence, en kHz. Si Φ est supérieur à 60°, on utilise la formule (11) avec $\Phi = 60°$. Si Φ est inférieur à $-60°$, on utilise la formule (11) avec $\Phi = -60°$. La Fig. 15 représente les valeurs de k, calculées à partir de la formule (11), conformément à ces règles.

Pour les trajets d'une longueur inférieure à 3000 km, on prend:

$$\Phi = 0{,}5\,(\Phi_T + \Phi_R) \qquad (12)$$

où Φ_T et Φ_R sont respectivement les latitudes géomagnétiques du point d'émission et du point de réception, déterminées en assimilant le champ magnétique terrestre à celui d'un dipôle placé au centre de la Terre et dont le pôle Nord a pour coordonnées géographiques 78,5° N et 69° O. L'équation pour Φ_T et Φ_R est donnée à la Fig. 16 et Φ_T et Φ_R sont positifs dans l'hémisphère Nord et négatifs dans l'hémisphère Sud. Les trajets d'une longueur dépassant 3000 km sont divisés en deux parties égales que l'on considère séparément. On prend pour valeur de Φ de chaque demi-trajet la moyenne de la latitude géomagnétique d'une extrémité et de celle du point milieu du trajet total, cette dernière étant supposée égale à la moyenne de Φ_T et Φ_R, de sorte que:

$$\Phi = 0{,}25\,(3\Phi_T + \Phi_R) \text{ pour la première moitié du trajet} \qquad (13)$$
$$\text{et } \Phi = 0{,}25\,(\Phi_T + 3\Phi_R) \text{ pour la seconde moitié} \qquad (14)$$

On prend alors la moyenne des valeurs de k calculées à partir de la formule (11) pour chaque demi-trajet et on la porte dans la formule (10).

2.7 *Coefficient d'affaiblissement horaire*

Le coefficient d'affaiblissement horaire L_t est donné à la Fig. 3, qui représente la moyenne des variations horaires du champ médian annuel pour l'Europe et l'Australie, calculée d'après les Fig. 2 et 6 du Rapport 431; t représente le nombre d'heures après le coucher ou avant le lever du Soleil selon le cas. Ces heures sont prises au

point milieu du trajet, au niveau du sol, lorsque d est inférieur à 2000 km et, pour les trajets plus longs, à 750 km de l'extrémité où le Soleil se couche en dernier ou se lève en premier. Les équations équivalant généralement à ces courbes à 0,5 dB près sont données dans le § 1 de l'Appendice I. Pendant l'heure qui précède le lever du Soleil, l'approximation est moins favorable (1 à 2 dB).

La Fig. 17 donne l'heure du coucher et du lever du Soleil en fonction de l'époque de l'année et de la latitude. Les équations équivalant à ces courbes pour le coucher et le lever du Soleil sont données au § 2 de l'Appendice I.

3. Variations du champ nocturne d'un jour à l'autre et durant de courtes périodes

Le champ dépassé pendant 10% du temps total d'une petite série de nuits au cours d'une saison déterminée pendant de courtes périodes centrées sur une heure donnée est supérieur de:

6,5 dB dans la bande 5,

et de 8 dB dans la bande 6,

à la valeur de E_0 mentionnée au § 2. On peut observer des valeurs plus grandes pendant la période du maximum d'activité solaire.

4. Variation saisonnière du champ nocturne

La nuit, les ondes hectométriques qui se propagent par l'ionosphère aux latitudes tempérées ont un champ plus intense au printemps et en automne qu'en été et en hiver, le champ minimal se produisant en été. La variation totale peut atteindre 15 dB aux fréquences les plus basses de la bande des ondes hectométriques, pour tomber à environ 3 dB dans la partie supérieure de la bande. Aux ondes kilométriques, on observe une tendance opposée de la variation saisonnière pendant la nuit, avec un maximum d'été prononcé. La variation saisonnière est beaucoup plus faible aux latitudes tropicales.

5. Valeur du champ pendant le jour

Dans la bande 5, en Europe, la valeur médiane du champ pendant le jour en hiver est de 10 dB inférieure à la valeur nocturne de E_0 donné au § 2. En été, la valeur du champ pendant le jour est inférieure de 30 dB à celle de E_0. Le champ dépassé pendant 10% du temps total d'une petite série de jours en hiver, pendant de courtes périodes centrées sur un temps donné, est supérieur de 5 dB à la valeur médiane diurne donnée ci-dessus.

Dans la bande 6, en Europe, la valeur médiane du champ pendant le jour en hiver est inférieure de 25 dB à la valeur nocturne de E_0 donnée au § 2. Pendant le jour, en été, la valeur du champ est inférieure d'environ 60 dB à la valeur de E_0.

Au printemps et en automne en Europe, les valeurs diurnes de champ, dans les bandes 5 et 6, se situent entre les valeurs de l'été et celles de l'hiver.

6. Précision des résultats obtenus

Pour les Etats-Unis d'Amérique, on pourrait obtenir des résultats plus exacts en prenant, pour heure de référence, deux heures après le coucher du Soleil. Les valeurs de champ mesurées aux Etats-Unis et au Brésil ont tendance à augmenter avec la fréquence; la variation du champ en fonction de la fréquence, donnée par la formule (11), est dans le sens opposé.

La formule (6) qui décrit la façon dont G_S est modifié par la valeur de la distance s_2 jusqu'au segment de terre suivant est théorique et doit donc être considérée comme provisoire en attendant de disposer de résultats de mesures.

La méthode établit une prévision du champ qui peut être observé si l'émetteur et le récepteur sont situés sur un sol de conductivité moyenne, généralement de 3 à 10 mS/m. Dans certaines zones (voir, par exemple, le Rapport 717), la conductivité réelle peut tomber à 0,5 mS/m ou atteindre 40 mS/m. Si la conductivité du sol à l'une ou à l'autre extrémité est d'un ordre de grandeur inférieur à 10 mS/m, le champ pourra avoir jusqu'à 10 dB de moins. Si la conductivité du sol aux deux extrémités est d'un ordre de grandeur inférieur à 10 mS/m, la réduction du champ sera doublée. La valeur de l'affaiblissement est fonction de la longueur du trajet et elle est la plus forte pour les ondes s'approchant de l'incidence rasante. La méthode peut être améliorée en faisant une correction lorsque la conductivité du sol est sensiblement différente de celle d'un sol moyen, par exemple en utilisant les renseignements donnés dans les Rapports 265 et 401.

Dans cette méthode, l'on suppose que la réflexion ne se produit que sur la couche E, ou que les réflexions par la couche E sont prépondérantes. Cependant, si $f >$ (foE) sec i, où foE est la fréquence critique de la couche E et i est l'angle d'incidence sur la couche E, l'onde traversera la couche E et sera réfléchie par la couche F. Ceci apparaîtra principalement dans le haut de la bande 6, pour des distances inférieures à 500 km, et surtout tard dans la nuit et pendant les périodes d'activité solaire minimale. Dans ce cas, la méthode peut encore être utilisée à condition de calculer p en tenant compte d'une réflexion sur la couche F à une hauteur de 220 km, et de calculer la force cymomotrice V pour l'angle de site correspondant.

Des mesures faites aux Etats-Unis conduisent à penser que la Fig. 3 (coefficient d'affaiblissement horaire) est vraisemblablement précise pour les fréquences voisines de 1000 kHz. Lorsque la fréquence s'écarte de cette valeur, surtout pendant les heures de transition, on risque de commettre des erreurs appréciables.

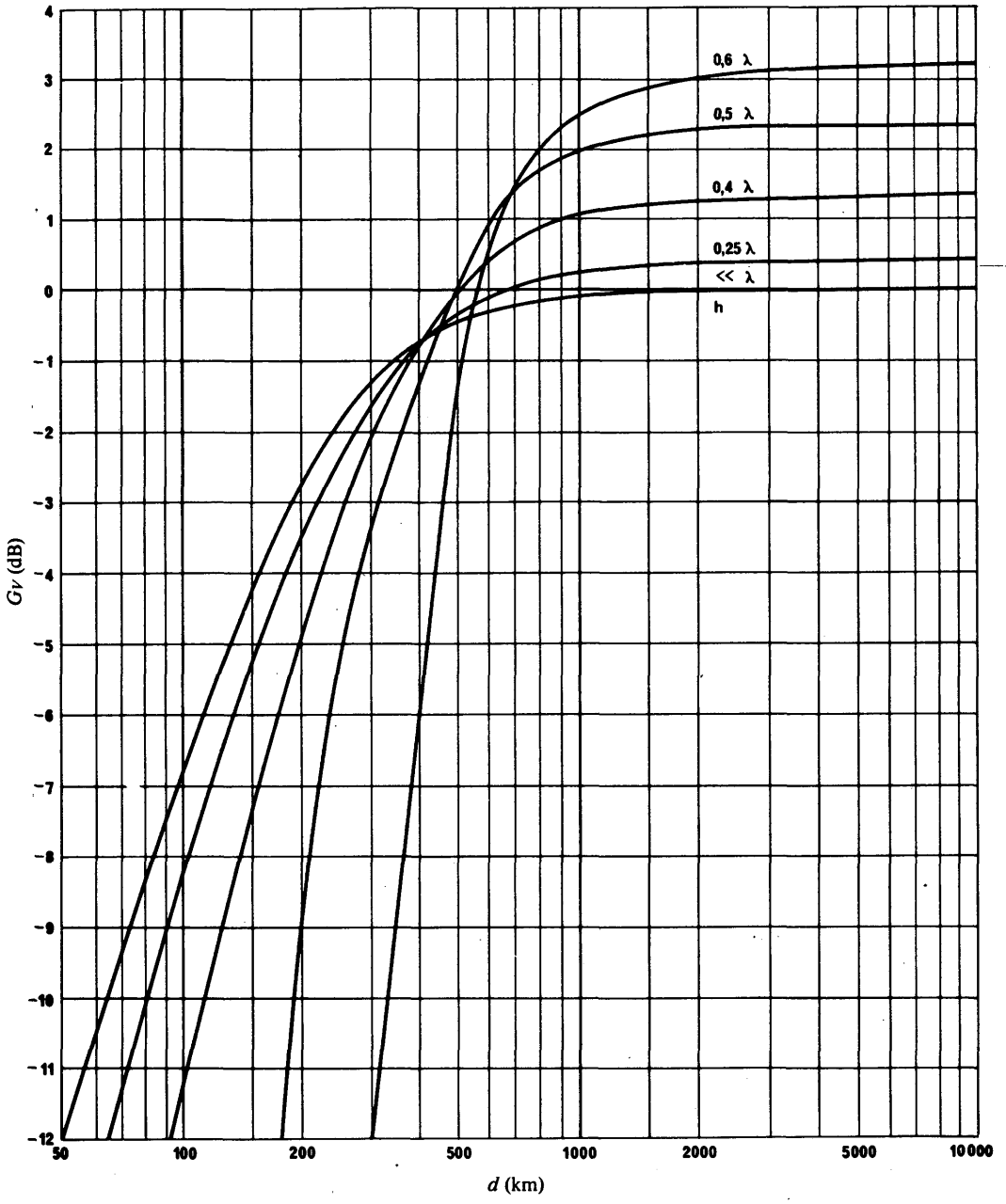


FIGURE 1 – *Gain de l'antenne d'émission (Gv) pour des antennes verticales simples*

h: hauteur de l'antenne

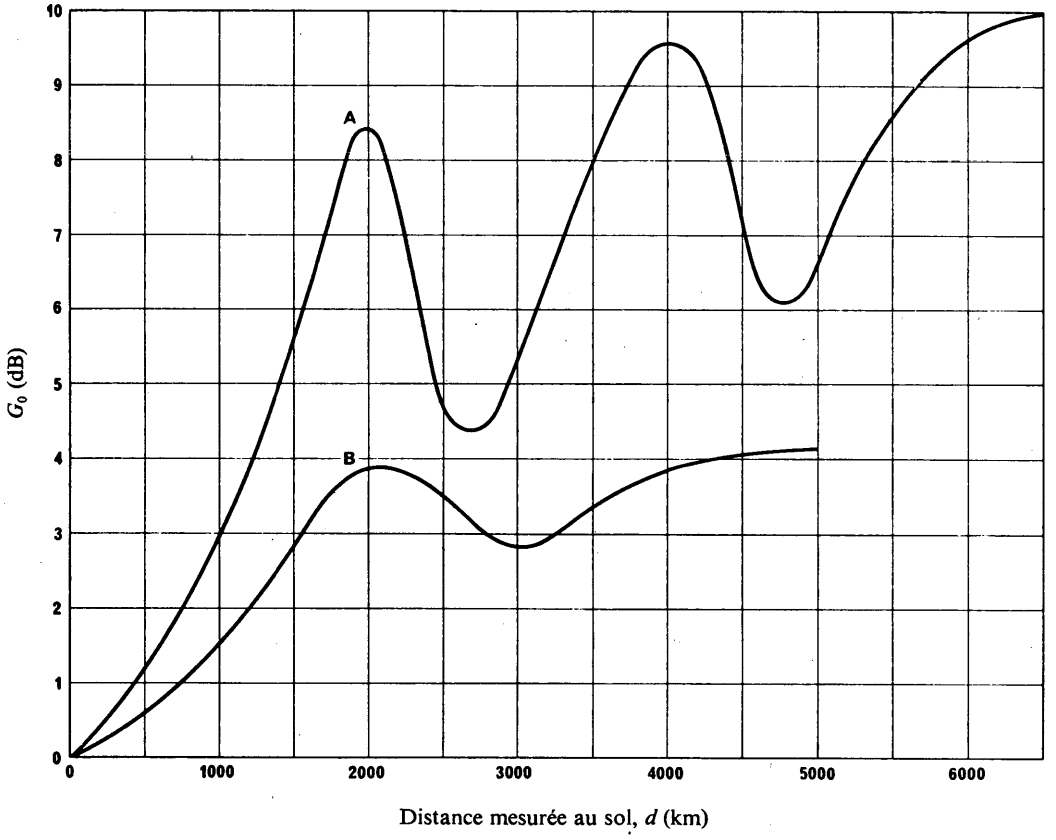


FIGURE 2 – *Gain dû à la proximité de la mer pour une seule extrémité située sur la côte (G_0)*

A: Bande 6 B: Bande 5

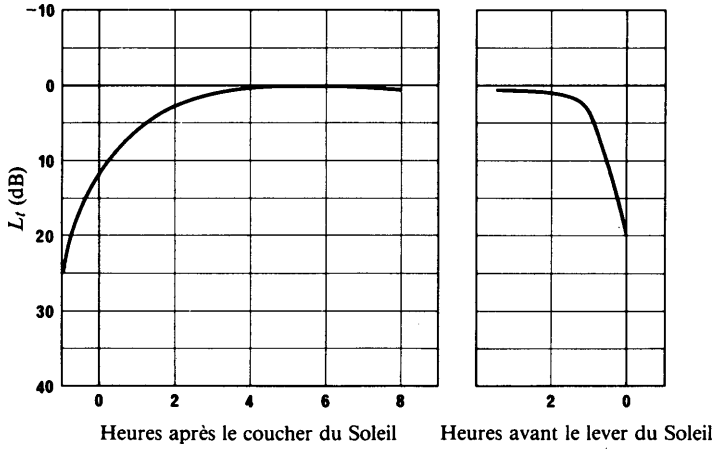


FIGURE 3 – *Coefficient d'affaiblissement horaire (L_t)*

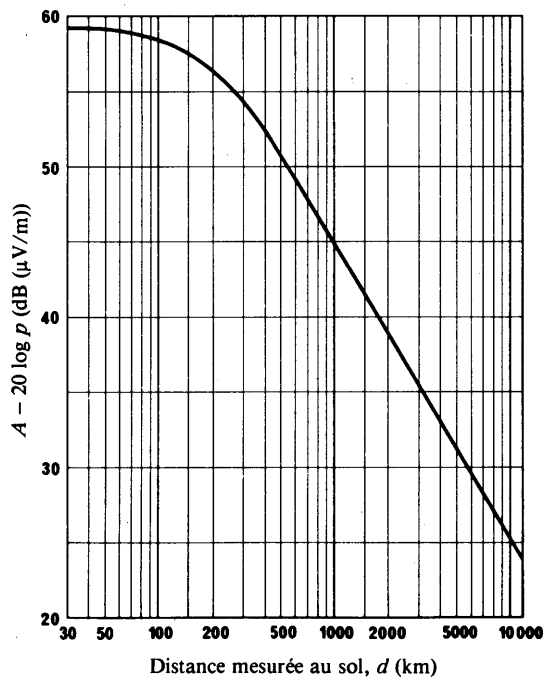


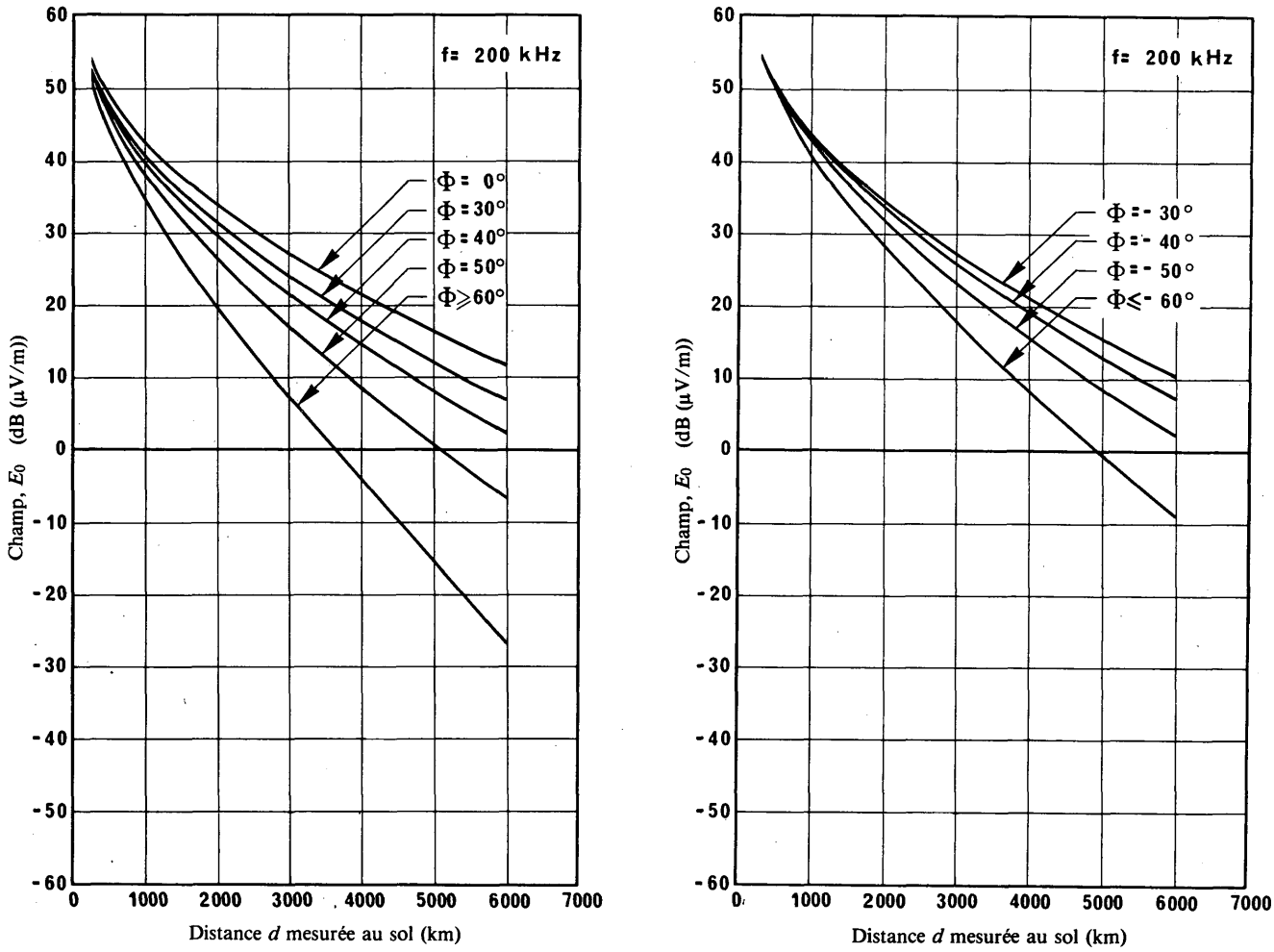
FIGURE 4 – *Champ de référence*

Les courbes représentent la variation de $A - 20 \log p$

$A = 106{,}6 - 2 \sin \Phi$

$\Phi = 40°$

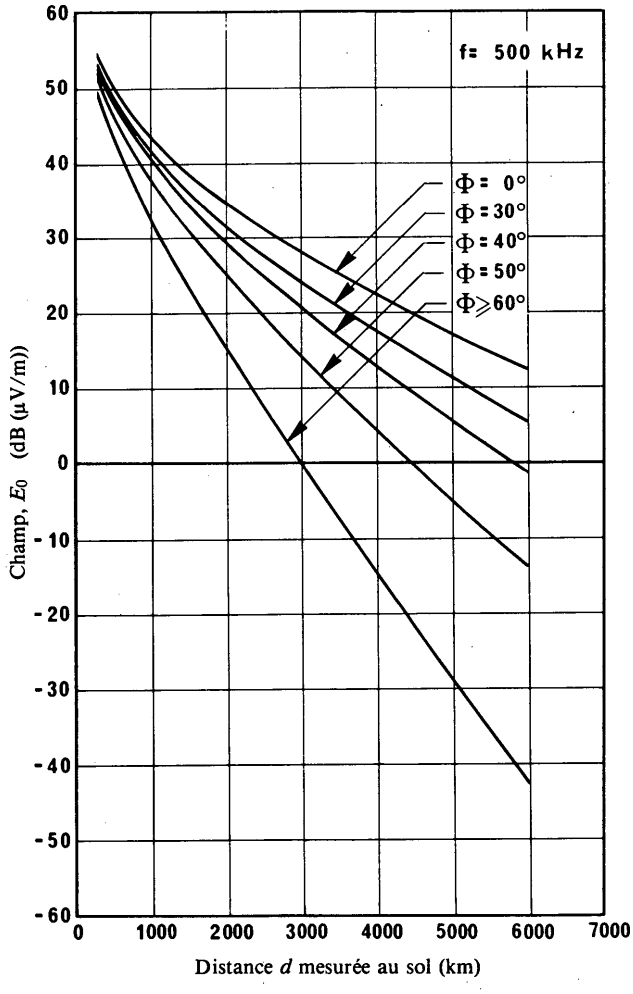
$p = (d^2 + 40\,000)^{1/2}$



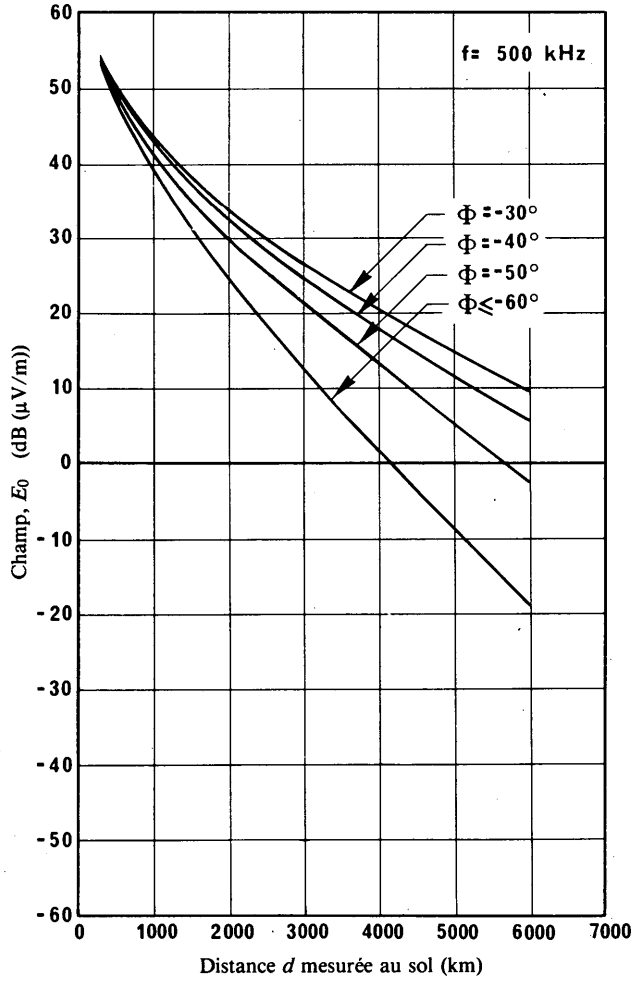
a) Hémisphère nord
(Φ positive)

b) Hémisphère sud
(Φ négative)

FIGURE 5 – *Courbes représentant E_0 pour 200 kHz, où G_S, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*

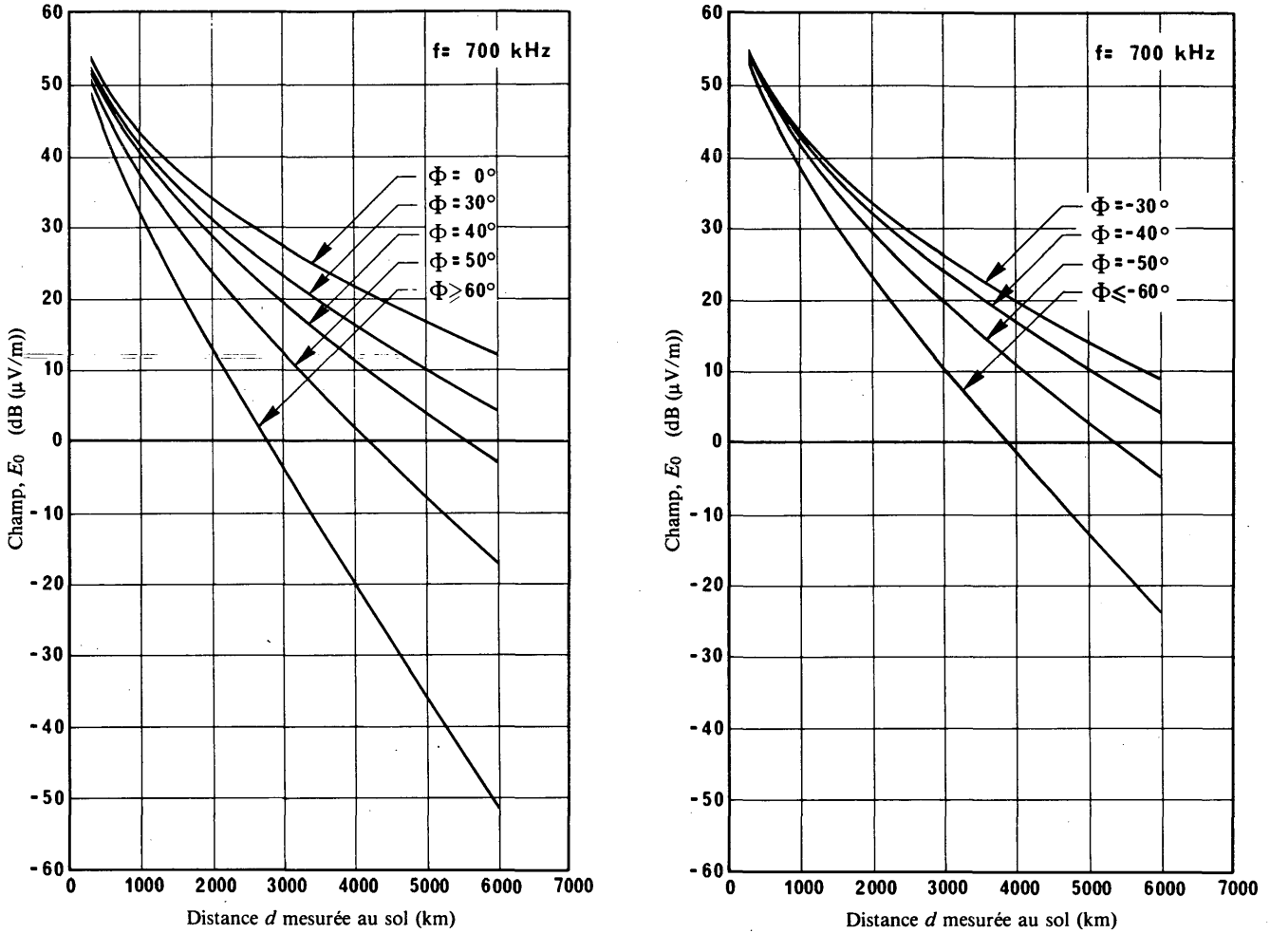


a) Hémisphère nord
(Φ positive)



b) Hémisphère sud
(Φ négative)

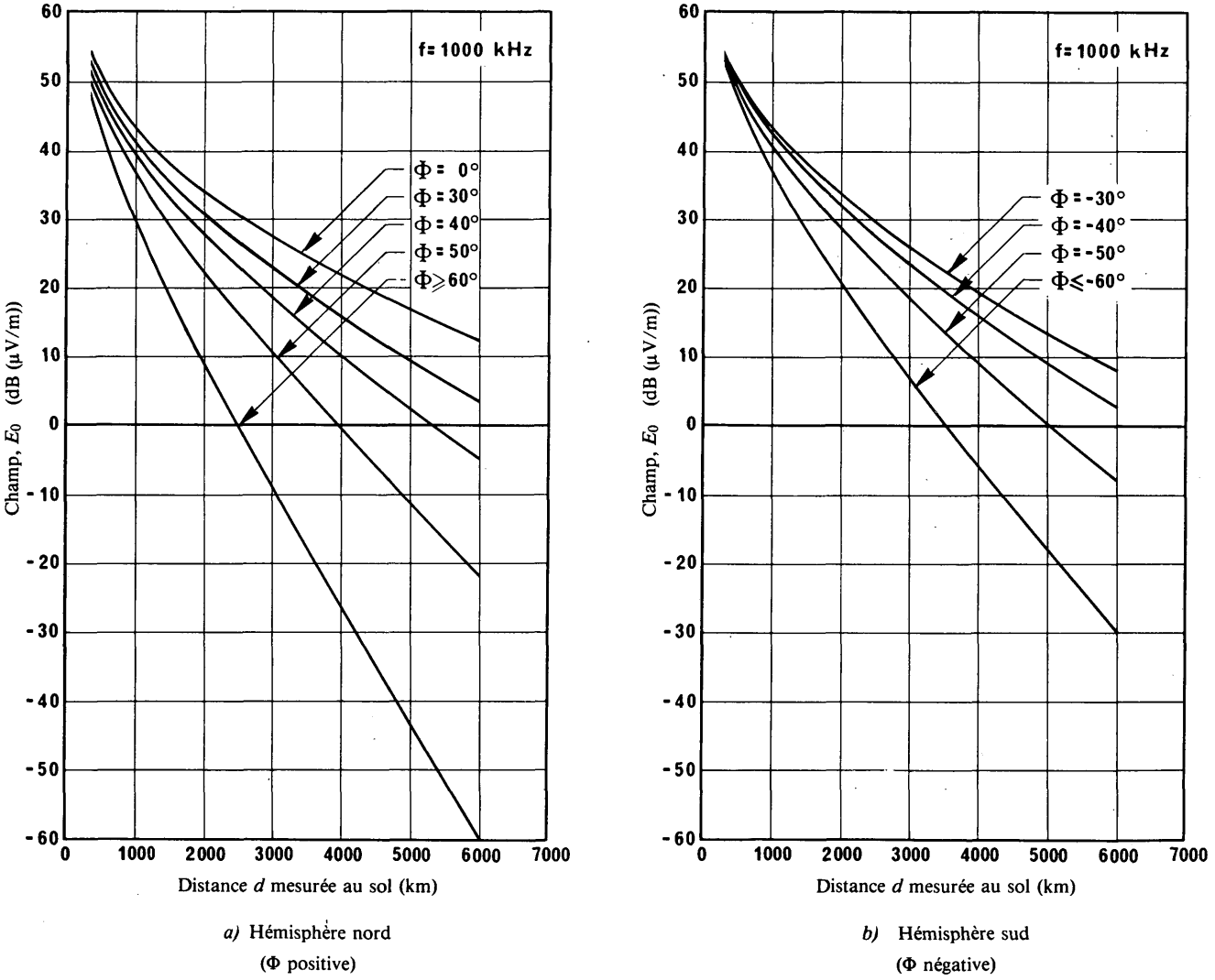
FIGURE 6 – *Courbes représentant E_0 pour 500 kHz, où G_S, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*



a) Hémisphère nord
(Φ positive)

b) Hémisphère sud
(Φ négative)

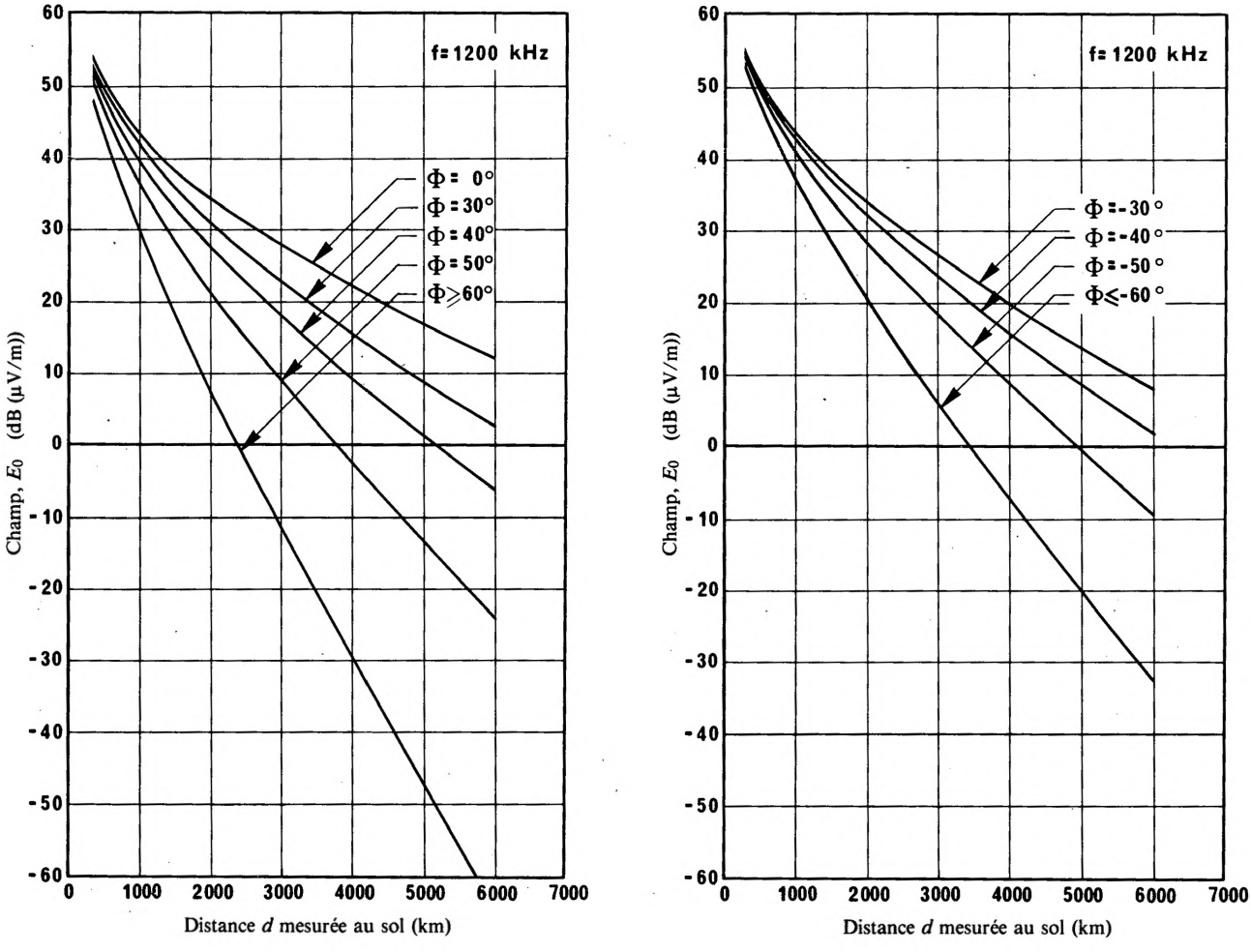
FIGURE 7 – *Courbes représentant E_0 pour 700 kHz, où Gs, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*



a) Hémisphère nord
(Φ positive)

b) Hémisphère sud
(Φ négative)

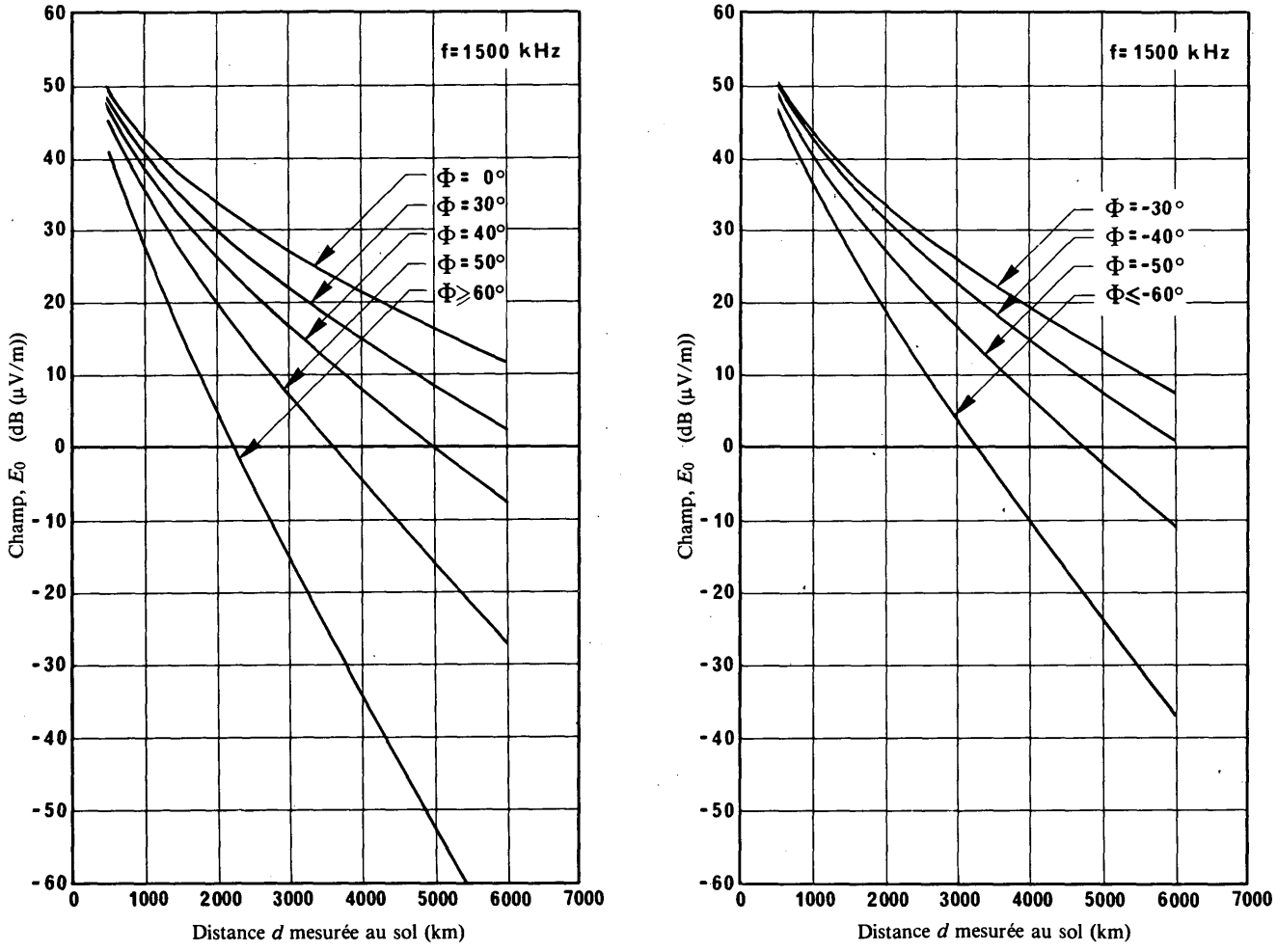
FIGURE 8 – *Courbes représentant E_0 pour 1000 kHz, où G_S, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*



a) Hémisphère nord
(Φ positive)

b) Hémisphère sud
(Φ négative)

FIGURE 9 – *Courbes représentant E_0 pour 1200 kHz, où G_S, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*



a) Hémisphère nord
(Φ positive)

b) Hémisphère sud
(Φ négative)

FIGURE 10 – *Courbes représentant E_0 pour 1500 kHz, où Gs, L_p et R sont tous égaux à zéro et pour des valeurs constantes de la latitude géomagnétique*

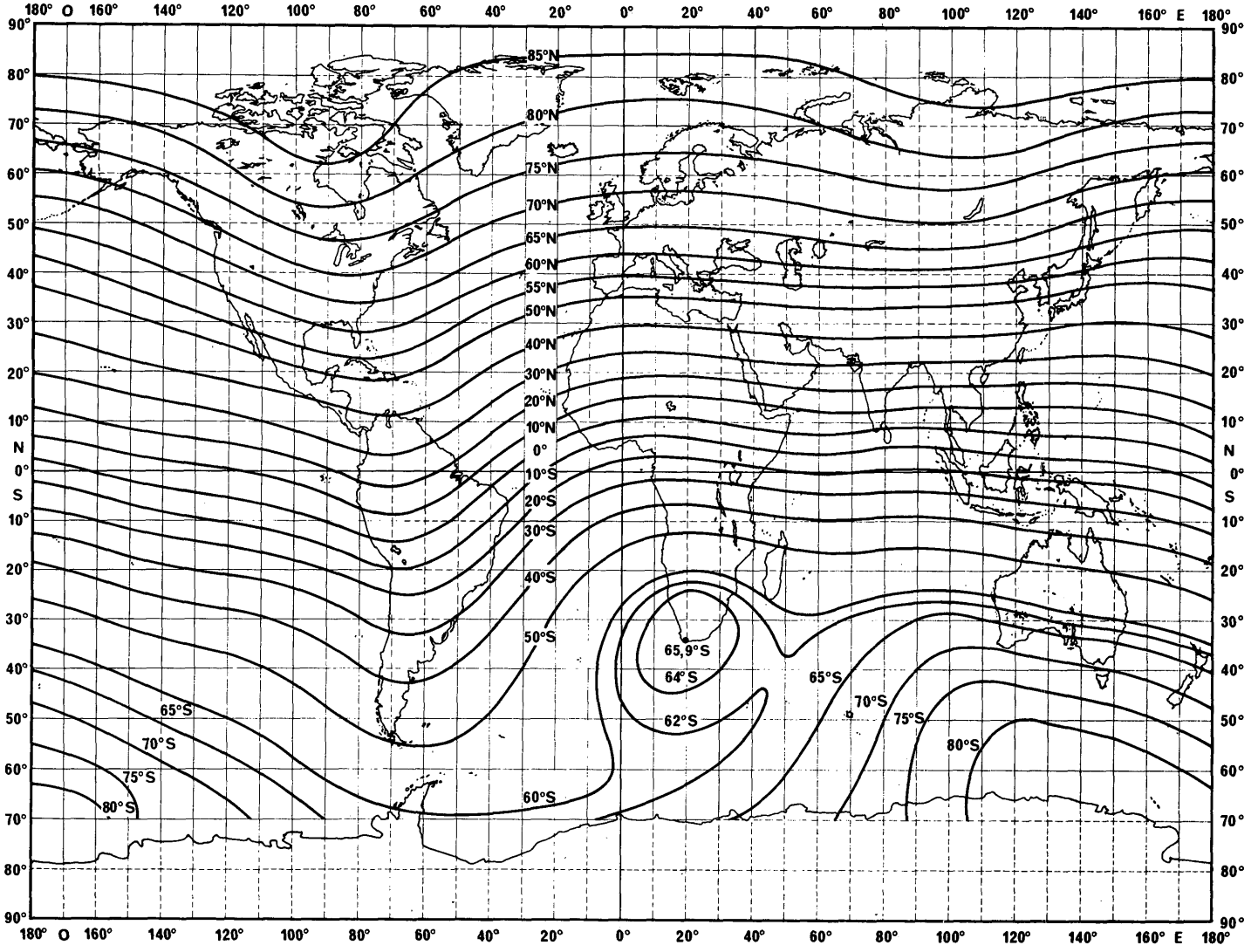


FIGURE 11 – *Carte de l'inclinaison magnétique (pour 1975,0)*

(Source: Magnetic inclination or dip (epoch 1975.0) Chart No. 30 World U.S. Defense Mapping Agency Hydrographic Center)

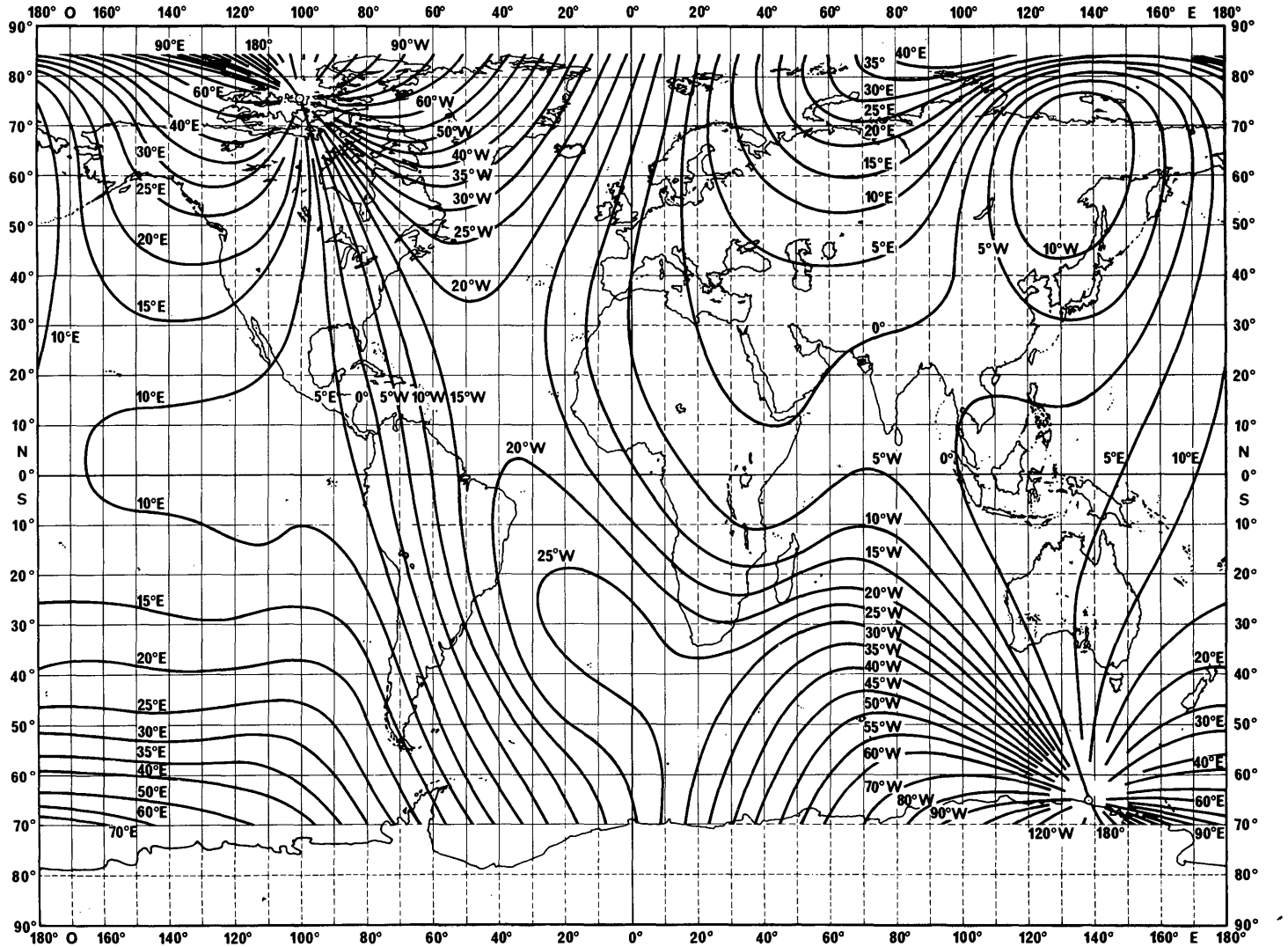


FIGURE 12 – *Carte de déclinaison magnétique (pour 1975,0)*

(Source: Magnetic variation (epoch 1975.0) Chart No. 42 World U.S. Defense Mapping Agency Hydrographic Center)

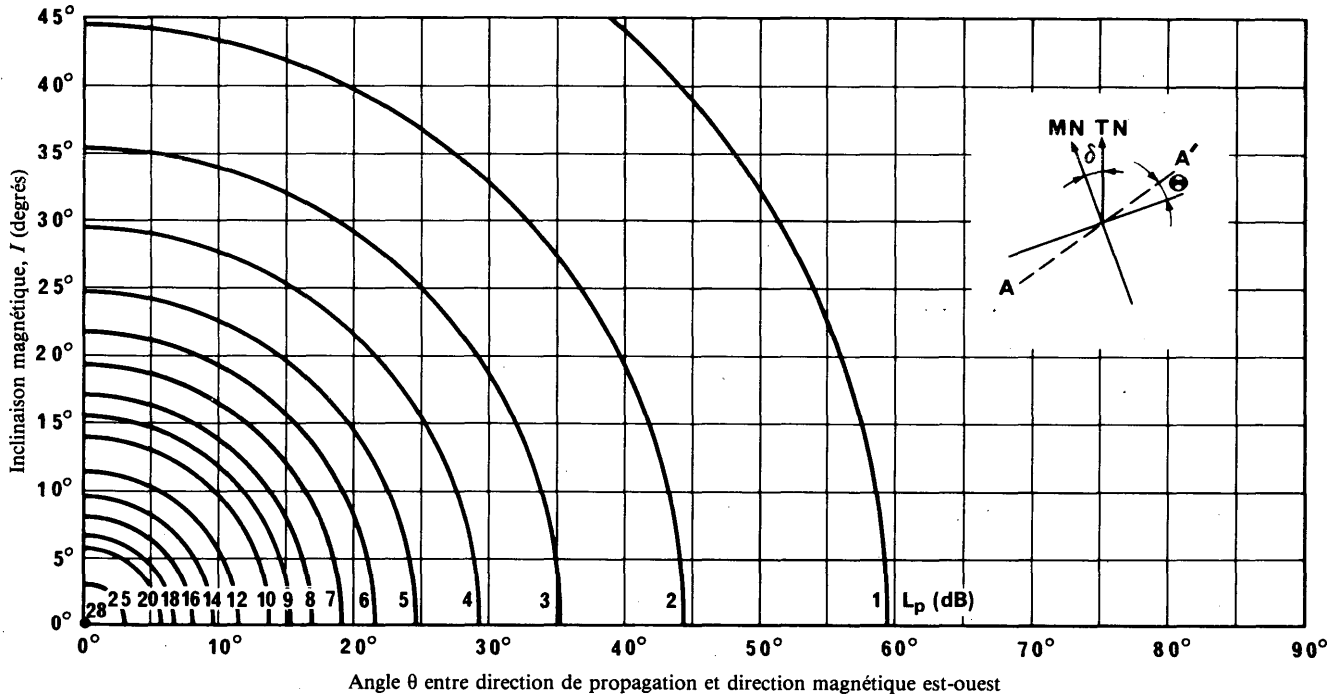


FIGURE 13 – *Surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation L_p (pour une seule extrémité)*

$$L_p = 180\,(36+\theta^2+I^2)^{-1/2} - 2$$

θ: arc sin [cos (α – δ)]

δ: déclinaison magnétique, en degrés (positive pour les déclinaisons Est par rapport au nord géographique)

α: direction de propagation AA', en degrés par rapport au nord géographique (comptée positivement dans le sens des aiguilles d'une montre)

MN: direction du nord magnétique

TN: direction du nord géographique

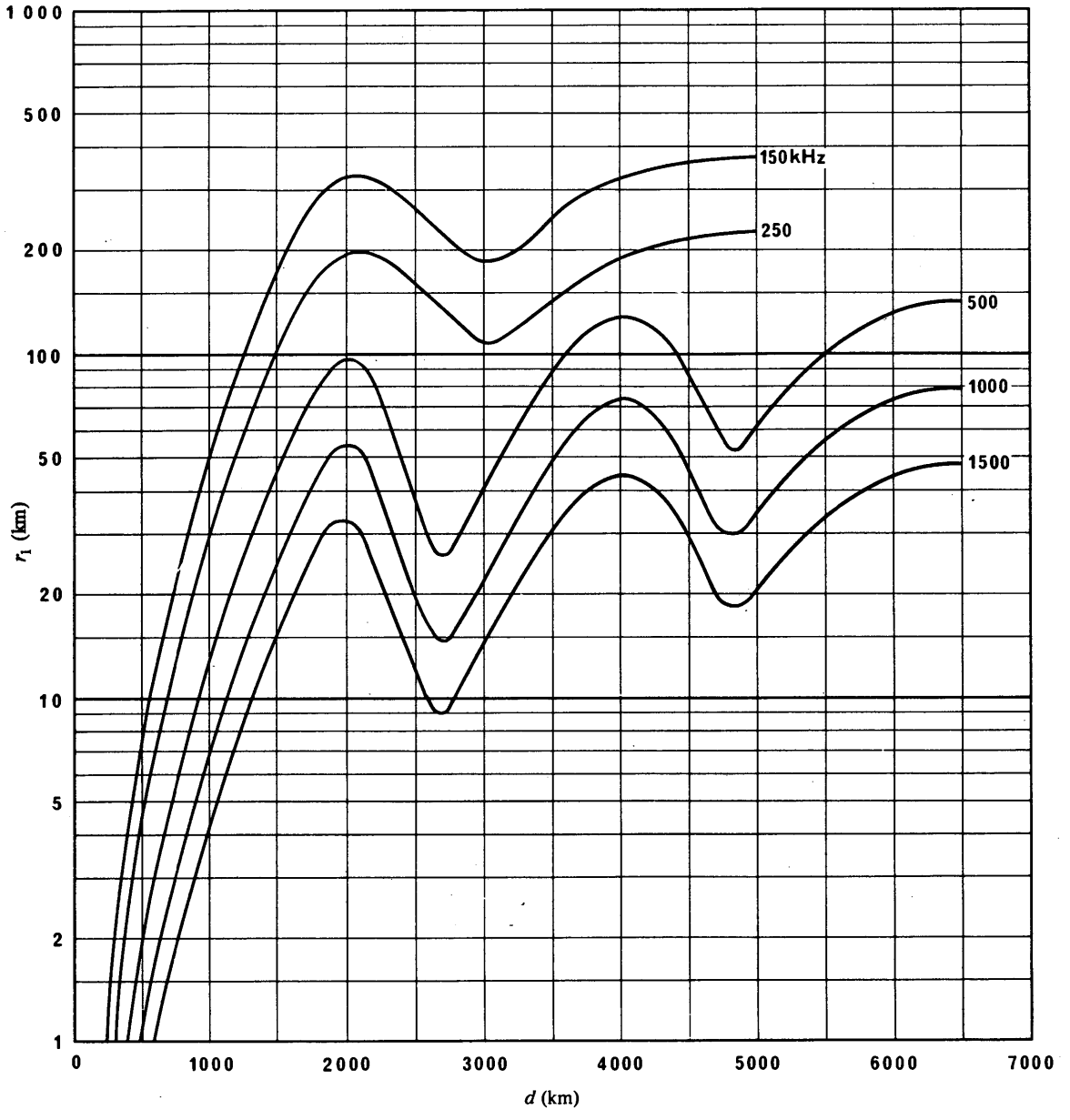


FIGURE 14a – *Valeurs de r_1 pour diverses fréquences*

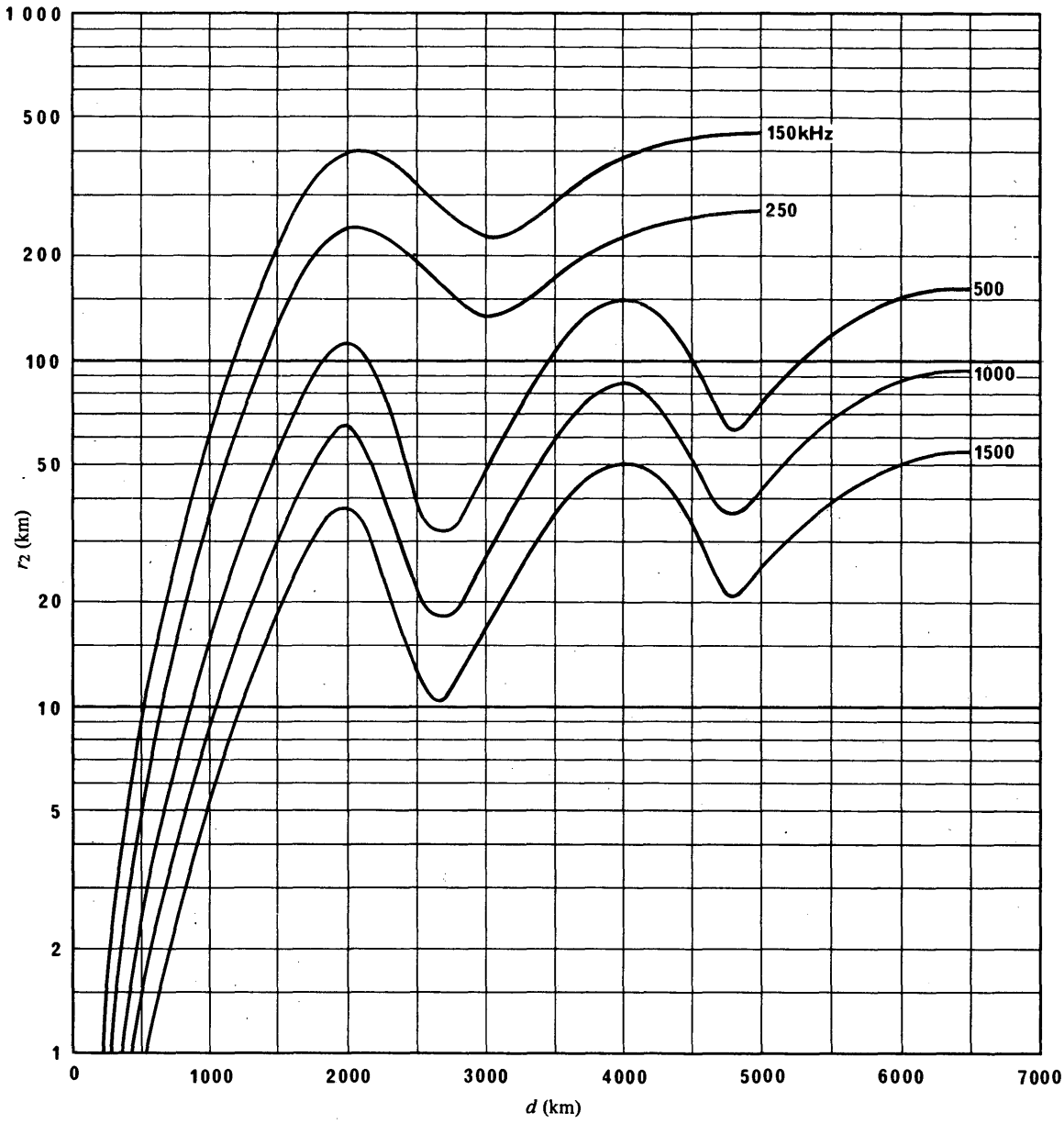


FIGURE 14b – *Valeurs de r_2 pour diverses fréquences*

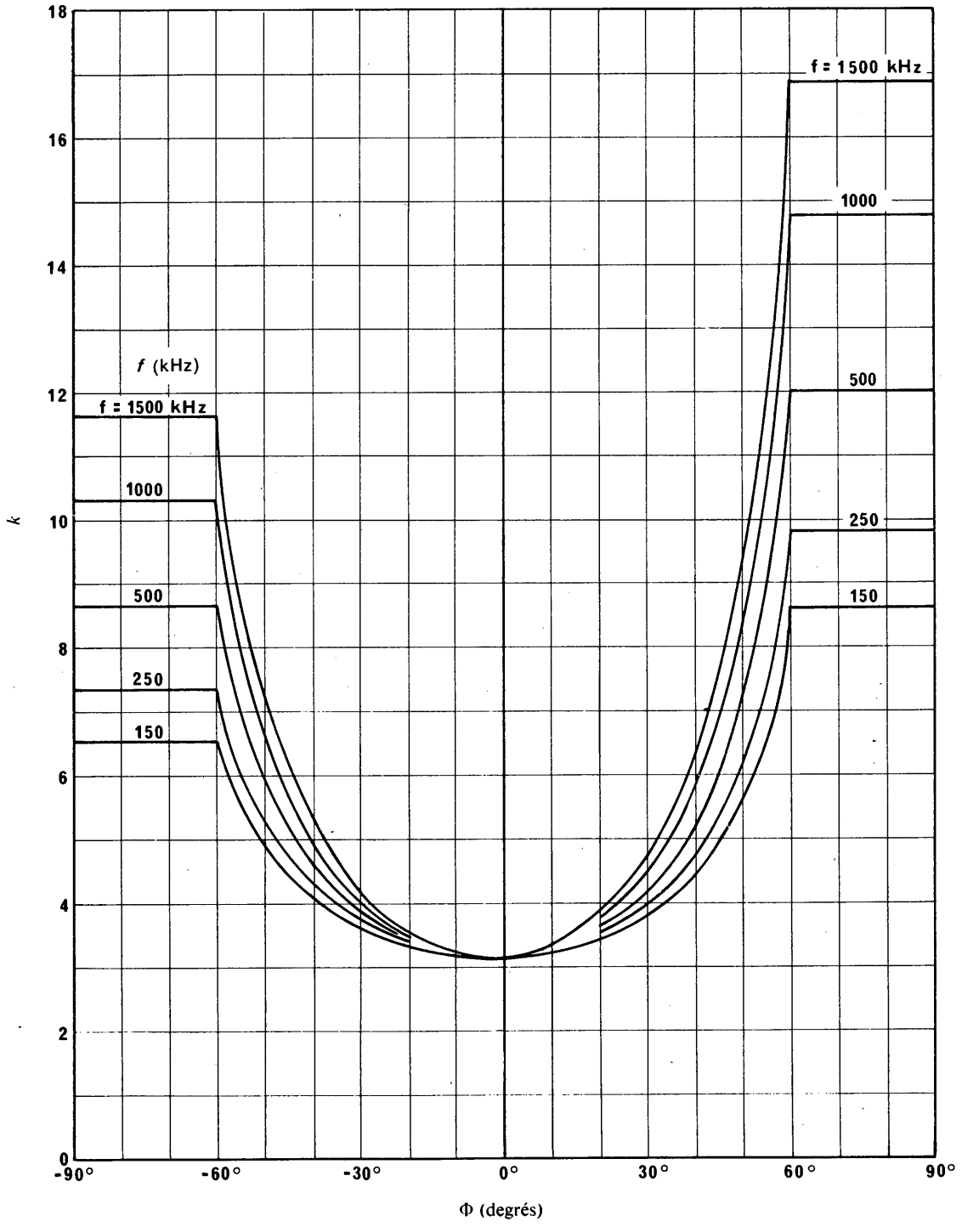


FIGURE 15 – *Coefficient d'affaiblissement*

$k = 3{,}2 + 0{,}19\, f^{0{,}4}\ \mathrm{tg}^2\,(\Phi + 3)$

$-60° \leqslant \Phi \leqslant 60°$

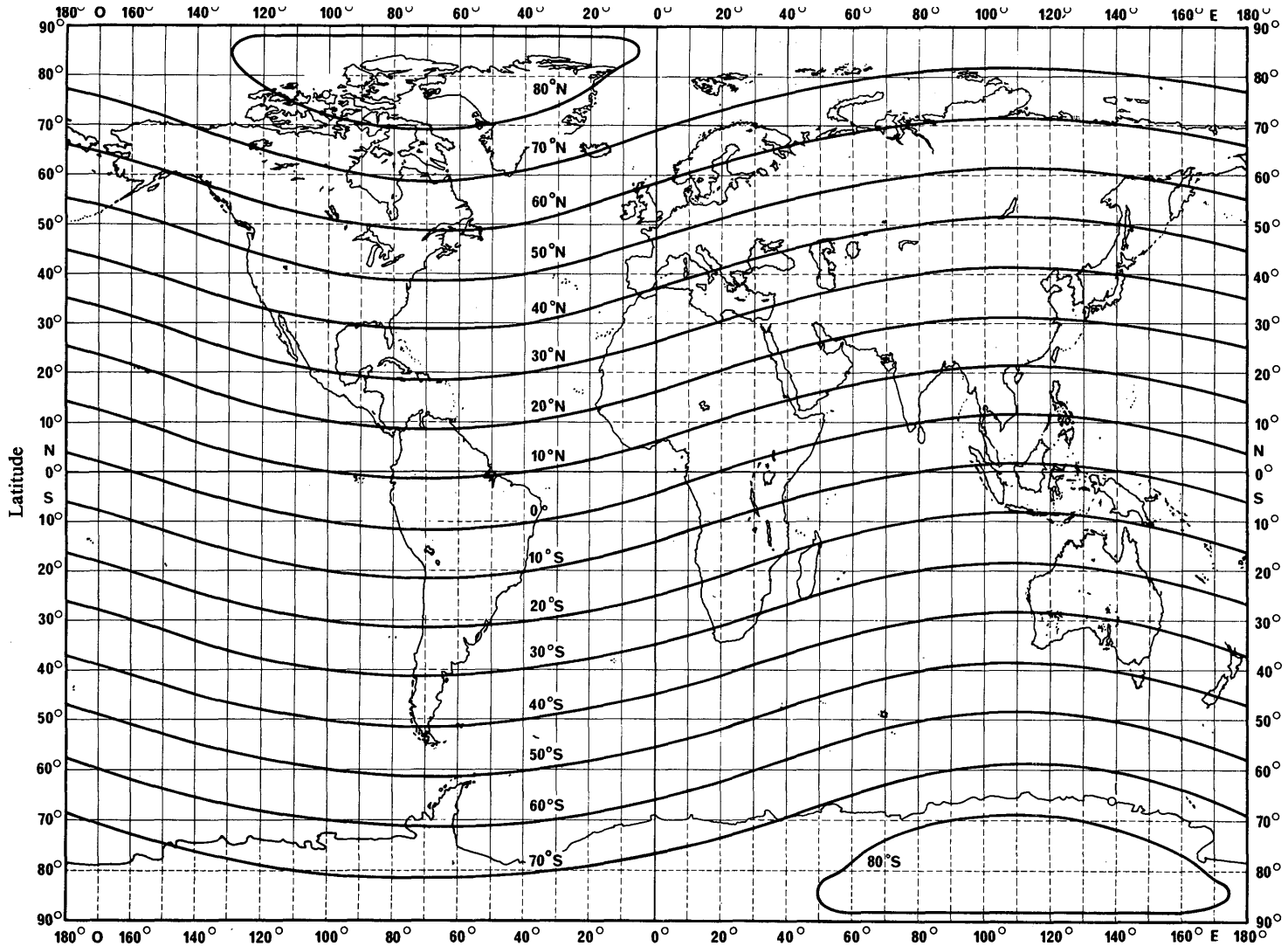


FIGURE 16 – *Latitudes géomagnétiques*

$\Phi = \arcsin [\sin \alpha \cdot \sin 78{,}5° + \cos \alpha \cdot \cos 78{,}5° \cdot \cos (69° + \beta)]$

Φ: latitude géomagnétique

α: latitude géographique

β: longitude géographique

Les coordonnées nord et est sont supposées être positives et les coordonnées sud et ouest négatives.

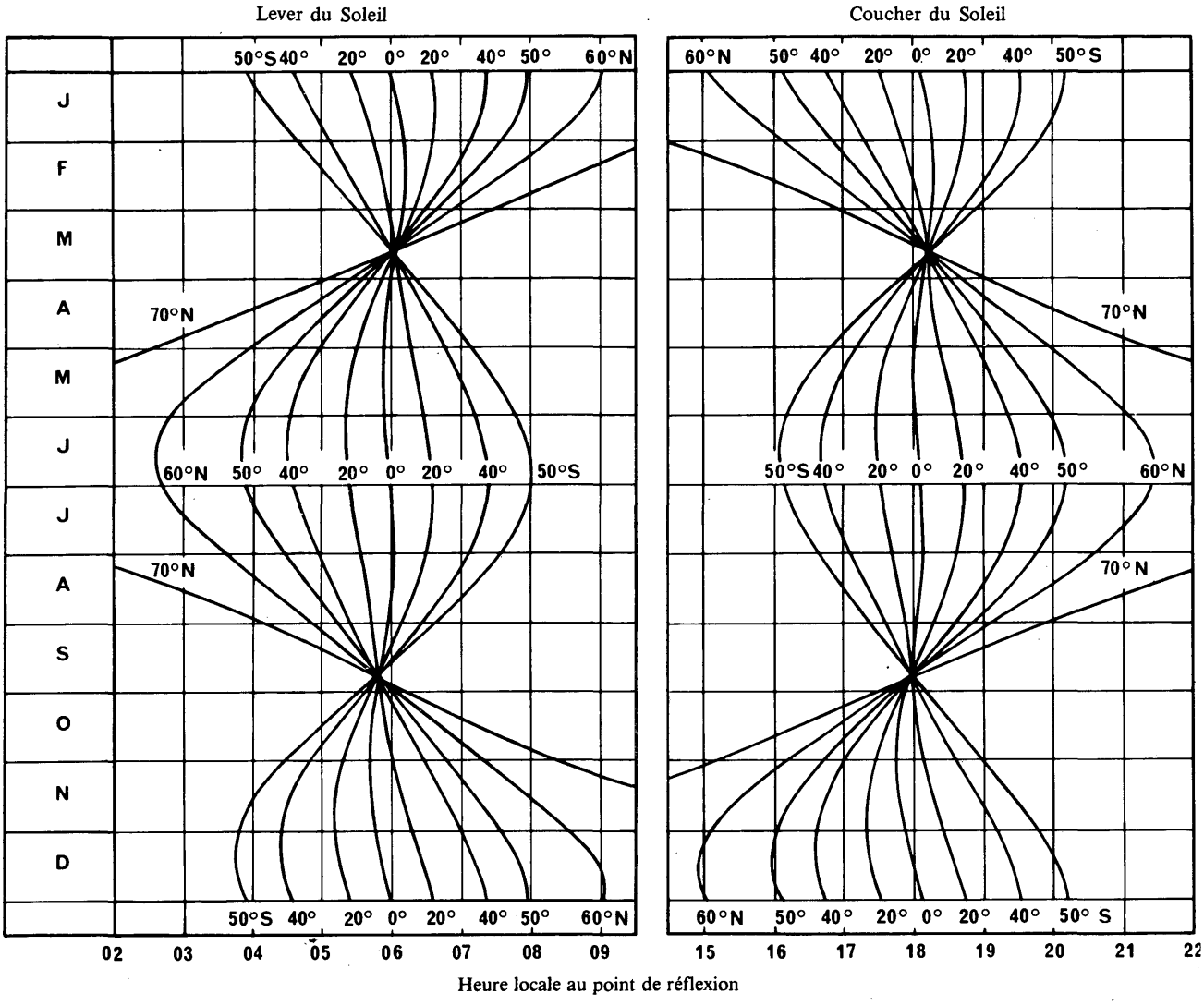


FIGURE 17 – *Heure du lever et du coucher du Soleil pour les différents mois et en fonction de la latitude géographique*

APPENDICE I DE L'ANNEXE I

Cet Appendice contient des équations susceptibles de remplacer les Fig. 3 et 17 dans le texte de l'Annexe I, pour évaluer le coefficient d'affaiblissement horaire et les heures du coucher et du lever du Soleil. Des équations sont également données pour la distance au sol, l'azimut du trajet, et les coordonnées des points sur le trajet. Les symboles supplémentaires suivants sont utilisés dans le présent Appendice:

Liste des symboles

α : latitude géographique d'un point sur le trajet (degrés)

β : longitude géographique d'un point sur le trajet (degrés)

S : heure moyenne locale du coucher ou du lever du Soleil à un point donné

Les coordonnées nord et est sont supposées être positives et les coordonnées sud et ouest négatives.

1. Coefficient d'affaiblissement horaire: L_t

Ces équations peuvent être utilisées à la place des courbes de la Fig. 3, dans les limites fixées de t. Pour les heures intermédiaires (par exemple, autour de minuit), $L_t = 0$.

L_t (coucher) $= 12{,}40 - 9{,}248\ t + 2{,}892\ t^2 - 0{,}3343\ t^3$ pour $-1 < t$ (coucher) < 4, et

L_t (lever) $= 18{,}48 + 18{,}39\ t + 5{,}954\ t^2 + 0{,}6167\ t^3$ pour $-4 < t$ (lever) < 1

où t représente l'heure comptée à partir du coucher ou du lever du Soleil au point milieu du trajet.

2. Heures du coucher et du lever du Soleil

Pour les sites en dehors des régions polaires, c'est-à-dire pour lesquels $|\alpha| < 65°$, les heures du coucher et du lever du Soleil peuvent être calculées, à 2 min près, comme indiqué ci-après:

N: jour de l'année, par exemple: 1er janvier = 1

S': heure locale, approximative de l'événement, par exemple: coucher du Soleil: 1800 h, lever du Soleil: 0600 h

Z: distance zénithale du Soleil (degrés) = 90,8333° (90° 50′) pour le coucher ou le lever du Soleil

Etape 1: Calculer la longitude de l'observateur, B:

$$B = \beta/15 \qquad \text{(h)}$$

Etape 2: Calculer l'heure de l'événement, Y:

$$Y = N + (S' - B)/24 \qquad \text{(jours)}$$

Etape 3: Calculer l'anomalie moyenne du Soleil, M:

$$M = 0{,}985600\ Y - 3{,}289 \qquad \text{(degrés)}$$

Etape 4: Calculer la longitude du Soleil, L:

$$L = M + 1{,}916 \sin M + 0{,}020 \sin 2M + 282{,}634 \qquad \text{(degrés)}$$

Noter dans quel quadrant se situe L.

Etape 5: Calculer l'ascension droite du Soleil, RA:

$$\operatorname{tg} RA = 0{,}91746 \operatorname{tg} L$$

Noter que RA doit se trouver dans le même quadrant que L.

Etape 6: Calculer la déclinaison, s:

s: déclinaison du Soleil donnée par:

$\sin s = 0{,}39782 \sin L$, d'où:

$$\cos s = + \sqrt{1 - \sin^2 s}$$

Noter que s peut être positif ou négatif mais que cos s doit toujours être positif.

Etape 7: Calculer l'heure solaire locale (exprimée en unité d'angle), H:

H: heure solaire locale donnée par:

$$\cos H = x = (\cos Z - \sin s \cdot \sin \alpha)/(\cos s \cdot \cos \alpha)$$

Noter que si $|x| > 1$, il n'y a ni lever ni coucher du Soleil.

A partir de cos H, on obtient H en degrés; pour le lever du Soleil: $180 < H < 360$, pour le coucher du Soleil: $0 < H < 180$.

Etape 8: Calculer l'heure (temps local moyen) de l'événement, S:

$$S = H/15 + RA/15 - 0{,}065710\ Y - 6{,}622$$

Noter que S est exprimé en heures et que des multiples de 24 devraient être ajoutés ou retranchés jusqu'à ce que $0 < S < 24$.

A noter que S représente l'heure locale au point concerné. Le temps légal correspondant est $S - B + \beta_m/15$ (heures), où β_m est la longitude du méridien de référence pour la zone de temps concernée (degrés), de sorte que, par exemple, le temps universel = $S - B$.

RAPPORT 432-2

PRÉCISION DES PRÉVISIONS DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE DANS LES BANDES 5 (ONDES KILOMÉTRIQUES) ET 6 (ONDES HECTOMÉTRIQUES)

(Programme d'études 31A/6)

(1970-1978-1986)

1. Introduction

Le champ de l'onde ionosphérique que l'on observe à la surface de la Terre dans les bandes 5 (ondes kilométriques) et 6 (ondes hectométriques), varie continuellement dans le temps et ne peut donner lieu qu'à des prévisions statistiques. On a pris l'habitude de faire les prévisions sur la base de mesure du champ, sans chercher à connaître au préalable tous les facteurs qui affectent la mesure. Si les erreurs dues aux appareils et au traitement des résultats sont petites, la précision de ces prévisions dépend des conditions qui règnent au point de réception et aussi de l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques du milieu de propagation seront très sensiblement les mêmes que dans le passé. Il s'agit là d'une hypothèse raisonnable, mais elle ne permet pas d'affirmer qu'il y a identité complète entre la précision d'une prévision et la précision obtenue dans la détermination d'une caractéristique statistique du champ, tant que l'on ne connaîtra pas mieux la morphologie du milieu de propagation et les causes des variations dans ce milieu, ou tant que les mesures ne seront pas faites sur une très longue période. Si l'on tient compte de ces limitations, on peut dire que la précision des prévisions dépend de la dispersion statistique autour d'une caractéristique commune.

Il y a eu un grand nombre de contributions au Programme d'études 31A/6, contributions provenant de l'UER, de l'OIRT, des Etats-Unis d'Amérique, de l'Inde, de l'Australie, du Japon et de la République fédérale d'Allemagne. On trouve des résultats détaillés de mesure du champ dans les campagnes de mesure de l'UER, de l'OIRT, du Japon, des Etats-Unis et de l'Australie; dans le présent Rapport, on s'est donc référé à ces sources de renseignements pour déterminer la précision des prévisions du champ de l'onde ionosphérique dans les bandes kilométriques et hectométriques.

Les mesures faites en Europe portent sur un grand nombre d'emplacements de réception, de trajets de propagation et de stations d'émission, tandis que les mesures effectuées en Australie se rapportent à un grand nombre de stations d'émission et de trajets, mais à un nombre très réduit d'emplacements de réception. Les données fournies par le Japon, qui ont été recueillies au cours d'une campagne régulière menée par des membres de l'ABU pour mesurer le champ de l'onde ionosphérique dans la bande hectométrique, couvrent de nombreux trajets de grande longueur. Ces différences dans les méthodes n'empêchent pas que l'on puisse comparer les résultats, que ce soit du point de vue des valeurs du champ ou du point de vue des variances inhérentes aux mesures. Il n'est pas question, dans le présent Rapport, d'analyser les différences entre les prévisions établies pour diverses parties du monde, mais plutôt d'étudier la précision des prévisions, les renseignements dont il faut disposer pour obtenir cette précision et la signification des différentes variances. Finalement, il sera tenu compte des différences susmentionnées, grâce à une seule méthode de prévision applicable à toutes les régions, comme indiqué au § 4 du présent Rapport.

2. Aspects généraux de la prévision du champ de l'onde ionosphérique dans la bande 6 (ondes hectométriques)

Etant donné la nature des évanouissements du champ de l'onde ionosphérique dans la bande 6 (ondes hectométriques), on est amené à penser que la répartition des valeurs instantanées peut être déterminée avec une précision suffisante à l'aide d'observations ayant une durée comprise entre une demi-heure et une heure, sauf durant les périodes où se produisent des changements généraux rapides, par exemple après le coucher et avant le lever du Soleil; il vaut mieux alors faire les observations pendant une durée d'un quart d'heure. La répartition des valeurs instantanées n'est pas constante, mais elle est nettement plus stable que d'autres caractéristiques statistiques du champ d'une nuit à une autre. On obtient une indication valable de cette répartition en déduisant des enregistrements les valeurs horaires de la médiane, du décile supérieur et du décile inférieur. Dans les bandes d'ondes hectométriques, le rapport décile supérieur/médiane a une valeur moyenne de 5 dB et un écart type* compris entre 1,1 dB et 2 dB.

---

* Les valeurs de l'écart type et de l'erreur type, en décibels, correspondent respectivement aux rapports: (écart type + moyenne)/moyenne et (erreur type sur la moyenne + moyenne)/moyenne.

Si l'on trace une courbe de la valeur médiane ou du décile supérieur en fonction des heures de nuit, on met en évidence une variation caractéristique générale pour une valeur donnée de la fréquence et de la distance et pour un mois particulier de l'année. Les médianes horaires pour un emplacement d'émission et un emplacement de réception donnés, pour une certaine heure de la nuit et un mois donné, ont une répartition dont l'écart type est compris entre 2,0 dB et 4,5 dB. L'erreur type* sur une valeur moyenne évaluée d'après ces médianes horaires est comprise entre 0,6 dB et 1,4 dB pour un échantillon de 15 valeurs; elle est comprise entre 1,1 dB et 2,6 dB pour un échantillon de 4 valeurs. On peut donc déterminer, avec une très grande précision, les moyennes mensuelles des valeurs médianes horaires; on se sert de ces moyennes pour étudier la variation du champ sur toute une année.

Si l'on fait la mesure sans tenir compte des variations qui se produisent au moment du lever ou du coucher du Soleil, les valeurs médianes horaires pour une station d'émission et un emplacement de réception quelconques ont une répartition annuelle dont l'écart type est compris entre 3,0 dB et 5,0 dB. La première de ces valeurs se rapporte à un certain nombre de trajets en Australie, sur lesquels des observations ont été faites durant la deuxième heure après le coucher du Soleil; sur ces trajets on a obtenu une répartition normale du champ médian horaire en $\mu V/m$. La seconde valeur est fournie par des mesures faites en Europe, où la répartition présente une très grande dissymétrie. Si l'on veut appliquer les méthodes statistiques normales, il faut transformer ces valeurs de manière à obtenir une répartition normale. On obtient une transformation satisfaisante en exprimant les valeurs médianes horaires en $dB(\mu V/m)$. Des résultats relevés sur certains trajets en Australie font apparaître aussi une répartition caractérisée par une dissymétrie excessive; sur une échelle en dB, on obtient ici un écart type de 4,2 dB. On a là une différence significative par rapport aux valeurs relevées en Europe. Ainsi, pour la deuxième heure après le coucher du Soleil, ou à minuit, l'erreur type pour la moyenne annuelle des valeurs médianes horaires est comprise entre 0,5 dB et 0,7 dB pour un échantillon de 52 valeurs.

Si pour plusieurs émissions, on marque sur un graphique les moyennes annuelles des médians horaires en fonction de la distance, on obtient une courbe caractéristique pour chaque fréquence d'émission autour de laquelle les moyennes annuelles sont réparties avec un écart type dont la valeur atteint, suivant les cas, 1,0 dB, 2,5 dB ou 5 dB. La première de ces valeurs correspond à des observations qui ont été faites en Australie en 1958/1959, époque durant laquelle on n'a pas observé de variation importante en fonction de la fréquence d'émission. La deuxième valeur se rapporte aux moyennes annuelles pondérées qui servent au calcul des prévisions de l'UER. La troisième valeur se rapporte à des mesures faites par des membres de l'ABU. Ainsi, pour une distance quelconque, l'erreur type de la caractéristique déduite des moyennes annuelles est 0,5 dB, 1,25 dB, 2,5 dB pour un échantillon de 4 valeurs, et 0,7 dB, 1,8 dB, 3,5 dB pour un échantillon de 2 valeurs.

Il convient d'attacher une plus grande importance à la répartition des valeurs moyennes annuelles, car celles-ci renferment des erreurs de mesure liées non seulement aux emplacements de réception, mais aussi aux emplacements d'émission. Il faut bien comprendre que, dans l'état actuel des connaissances sur les variations du signal de l'onde ionosphérique, cette affirmation vaut pour l'erreur sur une moyenne échantillon, dérivée d'une population hypothétique unique. Si l'on considère les statistiques, on s'apercevra que cette hypothèse est erronée mais, dans la détermination des courbes de propagation, l'écart des moyennes annuelles (entre les variances d'échantillons) représente une erreur. D'un autre côté, cette erreur représente une partie importante de la prévision du champ de l'onde ionosphérique, si elle est imputable essentiellement aux conditions qui règnent à l'emplacement de réception.

Une caractéristique particulière des résultats de l'UER est l'étendue des variations entre les échantillons, qui s'exprime dans la dispersion des moyennes annuelles pondérées. On peut évaluer l'importance de ces variations en comparant l'écart type entre les échantillons (2,5 dB) et l'erreur type sur les diverses moyennes, laquelle serait de 0,7 dB pour un échantillon de 52 valeurs. Une différence de 2,5 dB sur une moyenne échantillon relative à une population ne se produirait qu'une seule fois pour 1000 essais, si cette différence apparaissait de façon purement aléatoire. On n'a pas pu déterminer l'origine de cette différence, mais on pense qu'elle est liée à un certain nombre de facteurs, notamment l'influence des conditions prévalant au point de réception.

Si l'on veut réduire le volume de travail à prévoir pour les futurs essais de propagation, il convient d'appliquer des méthodes de mesure qui permettront de réduire le plus possible l'erreur type sur l'estimation. On a montré qu'il est possible d'atténuer l'influence de l'environnement au point de réception, en appliquant des corrections à la mesure.

Bien que des prévisions de champ aient été faites sous diverses formes depuis le début de l'exploitation de services de radiodiffusion, la pratique s'est établie de prévoir la médiane annuelle des médianes horaires pour une heure déterminée de la nuit ou pour un intervalle de temps déterminé après le coucher du Soleil. Cependant, dans certaines applications, il peut être nécessaire d'avoir une connaissance plus approfondie de la variation du champ de l'onde ionosphérique en fonction du temps et du lieu. En des emplacements distants de moins de 3 km environ, les valeurs instantanées du champ présentent plus ou moins les mêmes variations. En revanche, à des emplacements distants de plus de 6 km, la corrélation devient très mauvaise. Outre ces variations avec le temps et le lieu, on constate qu'à la surface du sol en zone urbaine, il s'établit un régime d'ondes stationnaires qui introduit

---

* Les valeurs de l'écart type et de l'erreur type, en décibels, correspondent respectivement aux rapports: (écart type + moyenne)/moyenne et (erreur type sur la moyenne + moyenne)/moyenne.

des variations du champ ionosphérique médian en fonction des emplacements. Ce régime d'ondes stationnaires se modifie ou se déplace d'heure en heure et d'une nuit à une autre. Le champ présente aussi des différences résiduelles, c'est-à-dire à long terme, d'un emplacement à un autre, mais ces différences sont généralement masquées par les variations de plus grande amplitude qui se manifestent entre les emplacements d'heure en heure et d'une nuit à une autre.

Se superposant à toutes ces variations, il existe des variations d'une nuit à une autre et d'une semaine à une autre qui sont communes à tous les emplacements situés dans une zone de grande étendue. Ces dernières variations sont plus amples que celles qui se manifestent entre emplacements avec le temps. En conséquence, les médianes horaires sont en assez bonne corrélation pour des emplacements séparés par des distances atteignant – voire dépassant – 350 km.

Le Tableau I, qui a été établi à partir des données restreintes disponibles, fournit une indication sur l'amplitude de ces variations.

Tout ce qui précède concerne uniquement le champ de nuit. On a fait des études des aspects statistiques du champ de jour d'après des données recueillies aux Etats-Unis d'Amérique. Il est apparu que la distribution du champ de jour, tout comme de nuit, présente des dissymétries appréciables. La valeur médiane du champ de jour a une forte tendance à être plus proche du décile inférieur que du décile supérieur, alors que c'est l'inverse pour le champ de nuit. De plus, le rapport du décile supérieur à la médiane est en général, pour le champ de jour, supérieur de 3 dB à ce qu'il est pour le champ de nuit.

3. Aspects généraux de la prévision de l'intensité de l'onde ionosphérique dans la bande 5 (ondes kilométriques)

Il n'est guère surprenant que les indications données dans le paragraphe précédent s'appliquent aussi aux prévisions du champ de l'onde ionosphérique dans la bande 5 (ondes kilométriques). Il faut cependant signaler un certain nombre de différences importantes en ce qui concerne l'amplitude de la variation.

En Europe, le rapport décile supérieur/médiane du champ décroît de 4,5 dB pour les petites distances, jusqu'à 1,6 dB pour les grandes distances. Sur une période d'un an et pour une couple quelconque d'emplacements d'émission et de réception, l'écart type des médianes horaires à minuit n'est pas très différent de celui qui correspond aux ondes hectométriques (5,0 dB). Les moyennes annuelles sur ondes kilométriques varient beaucoup plus que dans les bandes d'ondes hectométriques; il faut donc étudier un plus grand nombre de trajets de propagation (ou de points de réception) si l'on veut obtenir la même précision dans le tracé des courbes de propagation. L'écart type des moyennes annuelles, autour d'une caractéristique commune, est de 4,9 dB; en conséquence, on a une erreur type de 1,3 dB sur l'estimation, pour un échantillon de 14 valeurs.

TABLEAU I – *Variation du champ de l'onde ionosphérique hectométrique avec le temps et l'emplacement*

Mesures faites à deux emplacements	Mesures faites à plusieurs emplacements, dont l'un est l'emplacement servant de base	Ecart type (dB)
Rapport des champs médians horaires mesurés simultanément à chaque emplacement pendant deux à trois semaines		1 à 2
	Médiane du rapport des champs médians horaires mesurés simultanément à la base et à un emplacement (distant d'au plus 12 km de la base). Cette grandeur représente la dispersion des différences résiduelles entre la base et les emplacements qui l'entourent.	1
	Rapport de médianes sur 20 minutes mesurées à la base et à un emplacement, les mesures se faisant à plusieurs emplacements pendant plusieurs nuits (chaque emplacement étant à moins de 3 km de la base et n'étant soumis qu'une seule fois à la mesure).	0,4 à 2,7

4. Renseignements nécessaires pour établir des prévisions du champ de l'onde ionosphérique

Il existe, dans les travaux de prévisions, un degré de précision que les services de planification n'ont guère intérêt à dépasser; aussi, du point de vue pratique, il est inutile d'aller au-delà de cette précision. Il est difficile de fixer une limite absolue, mais on peut dire que l'erreur devrait être inférieure à celle qui causerait une diminution importante du nombre d'auditeurs satisfaits, dans la gamme la plus critique des rapports de protection désirés*. On peut penser que cette limite se trouve entre ± 1,5 dB et ± 3 dB.

Quand on fait des mesures pour établir des prévisions, on peut déterminer des moyennes avec la précision requise, correspondant à cette limite, en choisissant des échantillons d'une taille suffisante, comme indiqué au Tableau II. Il ne semble pas qu'il soit justifié de prendre plus d'un enregistrement par semaine pour une combinaison particulière distance-fréquence; en effet, pour un échantillon suffisamment grand, on aura une moyenne annuelle avec un écart type compris entre 0,5 dB et 0,7 dB, et une moyenne mensuelle avec une erreur type de 1,1 dB.

Il faut tenir compte, en plus de ces erreurs, des variances causées par des modifications survenant aux environs des emplacements de réception. Des cas typiques sont les suivants:

- antennes de réception installées très près de fils électriques pour la consommation domestique, auquel cas le champ en ondes hectométriques peut dépasser de 6 dB ou plus celui qui règne dans l'ensemble de la zone;
- emplacement de réception situé sur la côte, auquel cas le champ de l'onde hectométrique peut être porté jusqu'à 10 dB au-dessus de celui qui règne à des emplacements franchement à l'intérieur des terres (certaines méthodes de prévision tiennent compte de cette influence, qui s'exerce aussi bien à la réception qu'à l'émission);
- différences résiduelles qui se manifestent d'un emplacement à un autre, comme il est indiqué au § 2 et dans le Tableau I.

On peut utiliser les valeurs mentionnées dans le présent Rapport pour estimer le nombre minimal des trajets de propagation sur lesquels doit porter une campagne de mesures dans une région particulière. A l'exception de la région tropicale, où l'on doit s'attendre à des différences entre les directions de propagation nord-sud et est-ouest, l'erreur type des estimations est comprise entre 1,3 dB et 2,5 dB dans la bande 6 et elle est de 2,5 dB dans la bande 5 pour un échantillon de 4 valeurs moyennes annuelles appropriées à toute combinaison considérée de distance et de fréquence.

Le GTI 6/4 a choisi une méthode de prévision qui soit applicable dans toutes les régions. La précision d'une prévision obtenue selon cette méthode (voir la Recommandation 435) n'est pas aussi bonne que celle qu'on obtient en appliquant des méthodes conçues spécialement pour la région considérée. Dans la plupart des cas, cette perte de précision est d'ailleurs tout à fait acceptable et constitue un compromis satisfaisant eu égard aux avantages qu'on retire de l'emploi d'une seule méthode de prévision. Si l'on applique cette méthode aux 266 trajets répartis dans le monde pour lesquels on dispose de résultats de mesure, on constate que l'erreur sur les prévisions a un écart type de 7 dB.

La précision des prévisions dépend conjointement des précisions de mesure réalisables aux emplacements d'émission et de réception. Pour déterminer les valeurs sans affaiblissement, on peut mesurer le champ le long du trajet de propagation à l'extrémité émission. On se sert de ces résultats pour tracer une courbe appropriée (champ E de l'onde de sol multiplié par la distance d) qui donne le champ sans affaiblissement pour l'unité de distance lorsqu'on extrapole la courbe jusqu'à la distance zéro. L'erreur type dans le tracé de cette courbe est inférieure à 0,2 dB pour un échantillon de 14 valeurs. Dans les régions où la conductivité du sol varie peu dans le temps, les valeurs mesurées de ($E \times d$) ne changent guère pendant une période de cinq années pour autant que l'on maintienne les conditions de fonctionnement normales pendant la mesure et que le système de mise à la terre de l'antenne ne subisse pas de modifications de nature chimique.

Si l'on veut considérer plusieurs enregistrements comme un tout, il faut procéder avec la plus grande attention pour déduire une statistique unique de chaque enregistrement; en effet, la durée nécessaire à l'analyse des enregistrements peut constituer le facteur déterminant qui imposera des limitations à la portée d'un programme d'enregistrements. Cette considération peut être sans importance si l'on dispose d'appareils analyseurs à action continue ou automatique; en revanche, la durée de l'analyse peut devenir fort appréciable, si cette analyse doit être faite visuellement.

Il existe un moyen de réduire cette durée, qui consiste à choisir une statistique appropriée du champ. Les résultats d'un grand nombre de mesures faites dans les bandes d'ondes hectométriques ont montré que les différences entre les déciles supérieurs sont un peu plus petites que pour les valeurs médianes. Il s'ensuit que la moyenne des déciles supérieurs peut être déterminée avec une précision presque identique à celle des valeurs médianes, pour des échantillons de même grandeur. La détermination des déciles supérieurs se fait beaucoup plus rapidement que celle des valeurs médianes; on a ainsi une possibilité de mesure dont la précision n'est pas très inférieure à celle de la mesure des valeurs médianes.

---

* Dans le cas du brouillage dans une même voie, une élévation de 5 dB du niveau du signal brouilleur entraîne une diminution de 90% à 50% du nombre d'auditeurs satisfaits.

TABLEAU II

Enregistrements d'une demi-heure ou d'une heure	Bande d'ondes	Ecart type (dB)		Erreur type sur la moyenne ou erreur type sur l'estimation (dB)		Source
		A	B	A	B	
E_{10} / E_{50}	hecto	1,1		0,5 pour un échantillon de 6		Australie 1958/1959, 1963
			1,7 à 2 (1)			OIRT (Rome, 845 kHz)
	kilo		1,6			OIRT (Allouis, 164 kHz)
E_{50} pour une station d'émission quelconque et un emplacement de réception quelconque, à une certaine heure de la nuit, pour une période d'un mois	hecto	2,0		1,1 pour un échantillon de 4		Australie 1963
			2,5 à 4,5 (1)			OIRT (Rome, 845 kHz)
	kilo		3,7 à 5,7 (1)			OIRT (Allouis, 164 kHz)
E_{50} pour une station d'émission quelconque et un emplacement de réception quelconque, à minuit, pour une période d'une année	hecto	3,0	4,2	0,5 pour un échantillon de 52	0,6 pour un échantillon de 52	Australie 1958/1959
			3,7 à 4 (1)			OIRT (Rome, 845 kHz)
			5,0		0,7 pour un échantillon de 52	UER (Rome, 845 kHz, vers Darmstadt et Monte-Carlo, 1466 kHz vers Jurbise)
	kilo		5,1 à 5,5 (1)			OIRT (Allouis, 164 kHz)
			5,0		0,7 pour un échantillon de 52	UER (Allouis, 164 kHz vers Enköping)
Moyenne annuelle de E_{50} pour n'importe quelle transmission pour la période d'une année	hecto	1,0		0,5 pour un échantillon de 4		Australie 1958/1959
			2,5			UER 845 kHz, 1178 kHz, 1466 kHz
			2,6			Etats-Unis d'Amérique 1944 et 1954
			5,0			Japon (ABU) 1970-1973
	kilo		4,9		1,3 pour un échantillon de 14	UER 164 kHz

(1) Varie avec la saison.

Les valeurs inscrites dans les colonnes A se rapportent aux répartitions normales (μV/m), l'écart type et l'erreur type correspondant respectivement aux rapports (écart type + moyenne)/moyenne et (erreur type sur la moyenne + moyenne)/moyenne, exprimés en dB. Les valeurs inscrites dans les colonnes B se rapportent aux répartitions transformées, avec dissymétrie (dB(μV/m)).

Il existe une autre solution possible: l'écart type du rapport E_{10}/E_{50} est inférieur à l'écart type de E_{10} pour une période d'un mois ou d'une année. Puisqu'il n'existe pas de corrélation entre ces variables, l'erreur additionnelle introduite dans une valeur moyenne de E_{50} calculée d'après une moyenne mesurée de E_{10} et de E_{10}/E_{50} (pour un petit échantillon) n'est pas très importante. Dans la plupart des cas, on n'aura pas besoin de prendre un échantillon du rapport E_{10}/E_{50}; en admettant une valeur de 5 dB, on obtiendra une précision suffisante pour les bandes d'ondes hectométriques.

BIBLIOGRAPHIE

DIXON, J. M. [1977] The variation of MF sky-wave field strength. Broadcasting Engineering Division Report N° 48, Postal and Telecommunications Department, Australie.

EBERT, W. [1962] Propagation ionosphérique en ondes longues et moyennes. *Rev. de l'UER*, Partie A, **71**, 3-11, **72**, 68-80, **73**, 109-121.

SULANKE, H. et TÄUMER, F. [1967] Calculation of standard deviations and errors for medians of medium and long-wave field strength recordings. Contribution aux travaux du Groupe de travail international VI/4 du CCIR.

WANG, J. C. H. [1977] Prediction of medium-frequency skywave field strength in North America, *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-23, **2**, 43-49.

WANG, J. C. H. [1983] Interference and sharing at medium frequency: sky-wave propagation considerations. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 9-1 à 9-12. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1956]: Varsovie; XII/356 (Inde).

[1962]: VI/88 (Australie).

[1970-74]: 6/289 (Japon).

RAPPORT 1014

PRÉVISION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE POUR LA RADIODIFFUSION EN RÉGION 2 DANS LA BANDE 1605-1705 kHz

(1986)

1. Introduction

La Conférence administrative mondiale des radiocommunications (CAMR-79) a attribué la bande de fréquences 1605-1705 kHz à la radiodiffusion dans la Région 2, alors que les services fixe et mobile continueront à utiliser certaines parties de cette bande dans différentes parties du monde. La première session de la Conférence administrative régionale chargée de la préparation d'un plan de radiodiffusion dans la bande 1605-1705 kHz dans la Région 2 (BC-R2(1)) s'est tenue à Genève du 14 avril au 1er mai 1986. L'ordre du jour a été approuvé par la 39e session du Conseil d'administration (Résolution 509).

Reconnaissant la nécessité d'une étude préparatoire dans le domaine de la propagation de l'onde ionosphérique, préalablement à la tenue de la Conférence, la Commission d'études 6 du CCIR, à sa Réunion intérimaire de Genève (29 août-13 septembre 1983), a adopté la Décision 57 qui a remis en activité le Groupe de travail intérimaire 6/4. L'objet du présent Rapport est d'exposer les conclusions du GTI.

2. Etudes récentes

2.1 *Influence de la fréquence*

De très nombreuses données recueillies dans la bande 535-1605 kHz par la «Federal Communications Commission» (FCC) des Etats-Unis d'Amérique montrent à l'évidence que les champs de l'onde ionosphérique dépendent étroitement de la fréquence pendant les heures de transition. Par exemple, au moment du coucher (ou du lever) du Soleil, le niveau des signaux provenant d'une station fonctionnant à 1530 kHz est toujours supérieur de 15 dB environ au niveau des signaux provenant d'une station qui fonctionne à 700 kHz. Cette influence de la fréquence diminue à mesure que les heures de la soirée s'égrènent. Vers deux heures après le coucher du Soleil, les champs d'une station à fréquence élevée sont généralement supérieurs de 3 à 5 dB à ceux d'une station à fréquence plus basse. A minuit, l'influence de la fréquence est tellement faible (en général, différence de 1 à 3 dB, en faveur de la station à fréquence plus élevée) qu'on peut la négliger complètement. Etant donné la grande ampleur de l'étude, il semble qu'on puisse affirmer sans grand risque de se tromper que, pendant les heures de nuit (à partir de 2 heures après le coucher du Soleil), les conditions de propagation de l'onde ionosphérique sont très semblables pour 1,7 MHz et 1,6 MHz. En revanche, durant les heures de transition, on prévoit que les signaux des stations fonctionnant dans la nouvelle bande seront nettement plus forts que ceux transmis dans la bande inférieure.

2.2 *Influence de la latitude*

Un inconvénient majeur de la méthode appliquée actuellement pour la Région 2 (535-1605 kHz) réside dans le fait que cette méthode ne tient pas compte des effets de la latitude, laquelle exerce une très grande influence, sinon une influence prépondérante. Par ailleurs, les zones habitées de la Région 2 couvrent une gamme de latitudes géomagnétiques de plus de 120°, plus large que n'importe quelle autre Région de l'UIT. L'influence de la latitude est donc particulièrement importante dans le cadre de la présente étude.

Le champ de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes hectométriques diminue quand la latitude géomagnétique augmente. Cette corrélation, selon la Recommandation 435, peut être décrite par une fonction en tangente carrée de la latitude. De nombreuses données recueillies dans les zones de latitude moyenne de la Région 2 mettent en évidence une loi de dépendance plus ou moins similaire en fonction de la latitude. Les données provenant des zones de latitude élevée de la Région 2 montrent que les champs mesurés sont généralement plus faibles que ceux prévus avec les méthodes dont on dispose actuellement. Enfin, les données recueillies dans les zones de basse latitude font apparaître une tendance nettement opposée. On notera que les données provenant des zones de latitude élevée et de basse latitude de la Région 2 ne sont pas très nombreuses.

2.3 *Propagation diurne de l'onde ionosphérique*

La collecte de données sur les champs diurnes de l'onde ionosphérique se heurte à des difficultés, pour un certain nombre de raisons. Malgré cela, la FCC a réussi à recueillir une très grande quantité de renseignements sur cette propagation diurne, pour plusieurs niveaux d'activité solaire. Avant d'analyser ces données, on a procédé à des tests rigoureux, afin d'avoir la certitude qu'elles correspondaient effectivement à l'onde ionosphérique. On pense que les résultats de mesure obtenus sur huit trajets correspondent en fait à l'onde ionosphérique; ce sont ces résultats qui ont été étudiés. Une analyse des données recueillies par la FCC sur la propagation diurne de l'onde ionosphérique permet de formuler les conclusions suivantes:

2.3.1 La valeur médiane annuelle du champ de l'onde ionosphérique à midi est inférieure d'environ 45 dB à la valeur correspondante à minuit. Ce résultat est en bon accord avec les données recueillies au Japon et en Europe. En revanche, si l'on considère uniquement la période hivernale, le tableau peut être entièrement différent. Aux latitudes élevées où l'anomalie d'hiver nocturne est prononcée, la différence entre le champ diurne et le champ nocturne peut être beaucoup plus petite. Par exemple, durant la période du 1er novembre 1941 au 31 janvier 1942, les signaux de WLW (700 kHz, Cincinnati, Ohio) ont été captés à Portland, Oregon (longueur du trajet: 3192 km; latitude géomagnétique du point milieu: 53,2° N) régulièrement aux alentours de midi, avec une valeur médiane de 6 dB(1 μV/m). La valeur nocturne correspondante (6 heures après le coucher du Soleil) n'était que de 17,3 dB(1 μV/m), c'est-à-dire une différence d'environ 11 dB. En général, d'après des observations faites aux Etats-Unis d'Amérique, la différence entre les champs nocturne et diurne pendant les mois d'hiver est comprise entre 25 et 30 dB.

2.3.2 Les fluctuations d'un jour à l'autre des champs relevés à midi sont plus prononcées avec des signaux situés dans la partie supérieure de la bande des ondes hectométriques que pour des signaux situés dans la partie inférieure de cette bande.

2.3.3 En ce qui concerne l'influence de l'activité solaire, les champs diurnes de l'onde ionosphérique varient de la même manière que les champs nocturnes (voir aussi le § 2.4).

2.3.4 La variation saisonnière de la valeur médiane des champs diurnes est très prononcée. L'intensité maximale de ces champs se manifeste pendant les mois d'hiver.

2.4 *Influence de l'activité solaire et de l'activité magnétique*

L'activité solaire a pour effet de réduire l'intensité des champs nocturnes de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes hectométriques. La réduction est trois ou quatre fois plus importante en Amérique du Nord qu'en Europe, mais on pense qu'elle est négligeable aux latitudes tropicales. Une analyse des données recueillies dans la Région 2 donne à penser que cette réduction dépend de la latitude géomagnétique, de la fréquence, de la distance et du nombre de taches solaires (Rapport 431). Toutefois, pour les besoins de la planification il convient de faire les calculs sur la base des valeurs minimales de l'activité solaire.

Des résultats obtenus sur quelques trajets Etats-Unis-Canada montrent que l'absorption liée à l'activité magnétique est un facteur prédominant de la réduction du champ nocturne de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes hectométriques. Un autre facteur qui contribue sporadiquement à cette réduction, dans la période d'octobre à février, est l'absorption liée à l'anomalie d'hiver. Ces facteurs peuvent faire varier considérablement le champ médian (Rapport 431). Cependant, aux fins de la planification, on peut négliger l'influence de l'activité magnétique. On a étudié récemment les effets à court terme des orages magnétiques.

L'absorption liée à ces orages, notamment durant les 5 ou 10 jours qui suivent le début d'un orage, augmente en même temps que la fréquence. Par exemple, des observations faites à Grand Island, Nebraska, ont montré que le signal de la station KSTP (1500 kHz, Minneapolis, Minnesota) diminuait de 33 dB tandis que le signal de WCCO (830 kHz, St Paul, Minnesota) diminuait de 19 dB seulement au moment où un orage magnétique a éclaté (19 mars 1950, $Ap = 84$). En général, l'absorption liée aux orages est moins grave aux latitudes tropicales. Il convient d'ajouter que cette absorption ne présente pratiquement aucune variation diurne. Les orages agissent de la même façon sur le champ diurne et sur le champ nocturne.

2.5 *Champs dépassés pendant différents pourcentages de temps*

Compte tenu des nombreuses données recueillies dans la Région 2, on a observé les faits suivants pendant une année de faible activité solaire:

2.5.1 Aux basses latitudes (40° ou moins, latitude géomagnétique), le champ dépassé pendant 1% du temps est supérieur d'environ 9,5 dB au champ médian annuel. Cette différence augmente jusqu'à 15 dB environ aux latitudes élevées (60° ou plus).

2.5.2 Aux basses latitudes, le champ dépassé pendant 10% du temps est supérieur d'environ 6 dB au champ médian. Cette différence augmente jusqu'à 10 dB environ aux latitudes élevées.

2.5.3 Pour les besoins de la planification, on peut ajouter 12,25 dB et 8 dB à la valeur médiane pour déterminer respectivement les valeurs dépassées pendant 1% et pendant 10% du temps.

2.6 *Variation saisonnière du champ de l'onde ionosphérique*

Des mesures du champ nocturne effectuées dans les zones de basse latitude de la Région 2 (par exemple, au Mexique, dans les Caraïbes) n'ont mis en évidence qu'une variation saisonnière très limitée. Dans les zones de latitude moyenne de la Région, les mesures n'ont fait apparaître qu'un léger minimum pendant les mois d'été, généralement inférieur de 5 ou 6 dB à la valeur médiane. De leur côté, les mesures faites en Europe révèlent un minimum plus prononcé en été, avec des maxima au printemps et en automne (Rapport 431). On se reportera au § 2.3.4 en ce qui concerne la variation diurne du champ.

2.7 *Valeur des champs deux heures et six heures après le coucher du Soleil*

Les diverses administrations utilisent des heures de référence différentes dans les diverses Régions de l'UIT. Dans la Région 2, on a adopté comme heure de référence la deuxième heure après le coucher du Soleil (CS + 2) au point milieu du trajet. Dans la Région 1, on considère six heures après le coucher du Soleil (CS + 6), alors qu'en Australie l'heure de référence traditionnelle est minuit. La Fig. 3 de la Recommandation 435 montre que le champ, six heures après le coucher du Soleil, est supérieur de 2,5 dB au champ deux heures après. Une étude des données recueillies dans la Région 2 révèle ce qui suit:

2.7.1 La valeur 2,5 dB recommandée par le CCIR est extrêmement précise pour les trajets courts (un seul bond), quelle que soit la direction.

2.7.2 Cette valeur est également précise pour les trajets nord-sud, quelle que soit la longueur du trajet.

2.7.3 Pour les trajets est-ouest à plusieurs bonds, la différence entre les champs, six heures et deux heures après le coucher du Soleil, peut être beaucoup plus grande que 2,5 dB.

2.8 *Trajets courts*

La courbe originale de la FCC a été tracée pour des distances comprises approximativement entre 161 et 4300 km. La première session de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Buenos Aires, mars 1980) a adopté la version métrique de la courbe de la FCC, pour utilisation dans la Région 2. Les courbes ont été étendues aux distances de 100 à 10 0000 km. Une question s'est alors posée: comment faire l'estimation des champs de l'onde ionosphérique pour des trajets de longueur inférieure à 100 km? A noter qu'il n'existe pratiquement pas de résultats pour des trajets de propagation courts. La méthode décrite dans le présent paragraphe est fondée sur un raisonnement logique.

Les ondes hectométriques sont généralement réfléchies par la couche E de l'ionosphère, qui s'étend entre les altitudes de 90 et 130 km (Rapport 725). Il y a lieu de mentionner que la Fig. 2, Chapitre 3, Annexe 2 (Angle de site en fonction de la distance) des Actes finals de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2), Rio de Janeiro, 1981 (appelés ci-après Actes finals de Rio), correspond à une hauteur de 96,5 km (60 miles). Ainsi, même si le point de réception se trouve à 1 km seulement de l'émetteur, l'onde ionosphérique peut avoir à parcourir 193 km (96,5 km sur le trajet montant et 96,5 km sur le trajet descendant) pour atteindre sa destination. Si la distance dans le plan du grand cercle, entre les deux points, est portée à 100 km par exemple, la distance «oblique» effective n'est que de 217 km. Dans ce cas, la distance dans le plan de grand cercle a été multipliée par 100 alors que la distance oblique n'a augmenté que de 12%. On voit donc que l'onde ionosphérique doit parcourir une distance presque aussi grande pour atteindre des récepteurs se trouvant près de l'émetteur que pour atteindre un récepteur situé à plusieurs centaines de kilomètres. Les emplacements proches de l'émetteur ne présentent pas un grand avantage pour ce qui est de l'onde ionosphérique. Autrement dit, si les distances dans le plan du grand cercle sont suffisamment petites, les distances obliques sont plus ou moins constantes et le champ de l'onde ionosphérique augmente très peu quand la distance diminue. Si l'on avait adopté la distance oblique, il n'y aurait pas eu de problème, puisque cette distance n'est jamais inférieure à 200 km environ. Or, dans la Région 2 on utilise la distance dans le plan du grand cercle depuis des dizaines d'années. Il serait peut-être souhaitable d'utiliser une autre méthode pour calculer les champs de l'onde ionosphérique pour des distances courtes.

2.8.1 Nous proposons ce qui suit dans les cas où la distance dans le plan du grand cercle, d, est inférieure à 200 km:

- utiliser la valeur effective de la distance dans le plan du grand cercle pour déterminer l'angle de site;
- si cette méthode est adoptée et si on utilise les courbes de champ des Actes finals de Rio (Annexe 2, Chapitre 3, Fig. 4) pour les fréquences supérieures à 1605 kHz, lire sur la courbe la valeur correspondant à $d = 200$ km. En d'autres termes, nous proposons que la courbe de la Fig. 4 soit assimilée à une ligne droite horizontale pour les distances comprises entre 0 et 200 km.

2.9 *Variation diurne*

Les champs médians horaires varient d'heure en heure, surtout au moment du lever et du coucher du Soleil.

La Fig. 1 illustre la variation moyenne F, rapportée à la valeur deux heures après le coucher du Soleil au point milieu du trajet, pour les périodes du lever et du coucher du Soleil.

Ces courbes s'appliquent à la bande 1605-1705 kHz pour 50% du temps.

Un certain nombre de valeurs sont données dans le Tableau I.

Elles peuvent être calculées par application des formules suivantes qui donnent F(dB), c'est-à-dire 20 log F. La variable t désigne le temps par rapport au lever ou au coucher du Soleil au point milieu du trajet.

Lever du Soleil:

$$F(\text{dB}) = -6{,}616 - 10{,}112\ t - 2{,}034\ t^2 + 0{,}423\ t^3 \quad (1)$$

Coucher du Soleil:

$$F(\text{dB}) = -7{,}938 + 10{,}050\ t - 2{,}310\ t^2 - 0{,}577\ t^3 \quad (2)$$

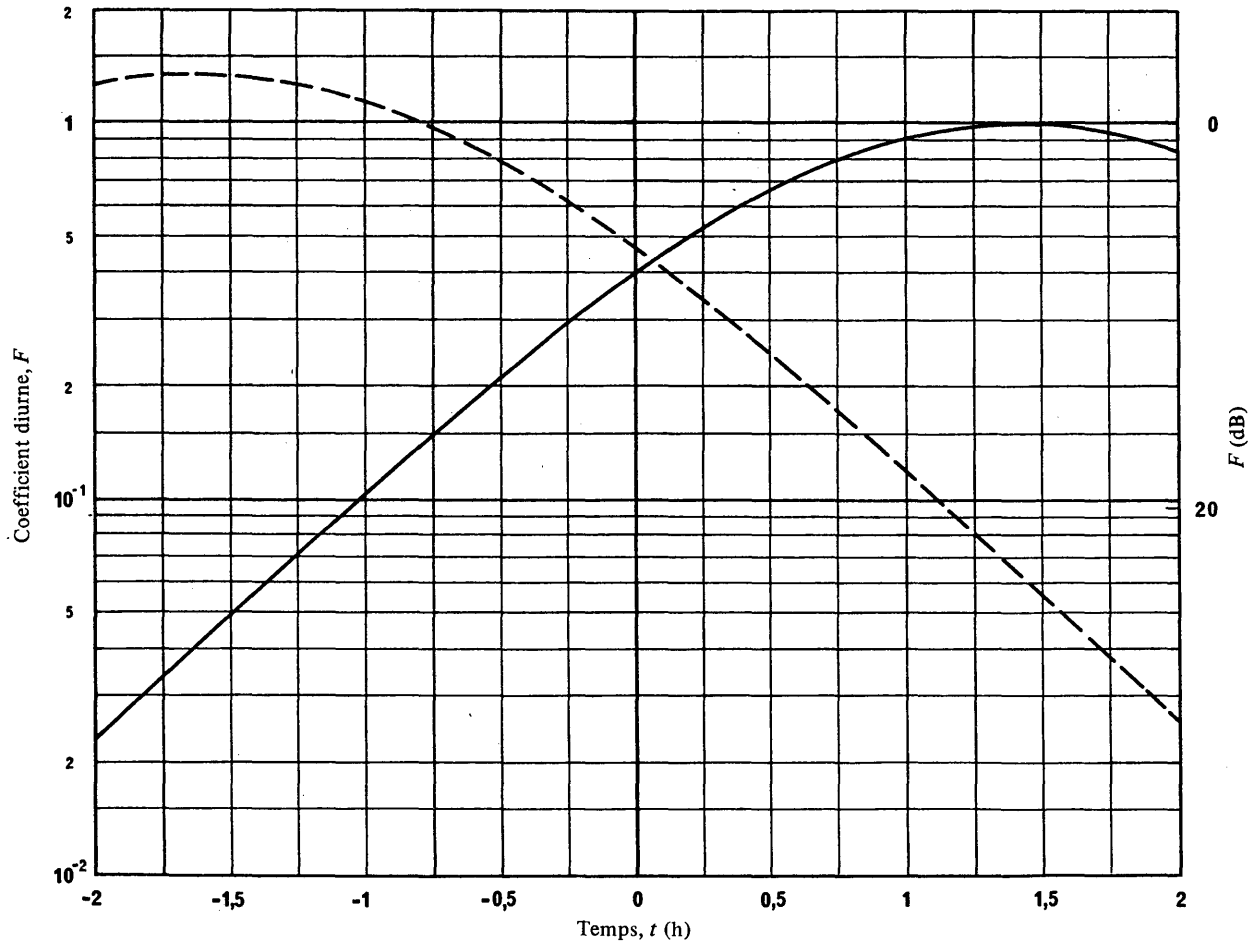


FIGURE 1 – *Courbes diurnes pour la fréquence 1655 kHz*

——— Coucher du Soleil

— — — Lever du Soleil

TABLEAU I – *Valeurs de F pour la fréquence 1655 kHz*

t (h)	Lever du soleil		Coucher du soleil	
	F (dB)	F	F (dB)	F
−2,00	2,08	1,270	−32,66	0,0233
−1,75	2,57	1,345	−29,51	0,0335
−1,50	2,54	1,339	−26,26	0,0486
−1,25	2,01	1,260	−22,98	0,0709
−1,00	1,03	1,126	−19,72	0,103
−0,75	−0,36	0,959	−16,53	0,149
−0,50	−2,13	0,782	−13,47	0,212
−0,25	−4,23	0,614	−10,59	0,296
0,00	−6,63	0,466	−7,94	0,401
0,25	−9,28	0,344	−5,58	0,526
0,50	−12,14	0,247	−3,56	0,664
0,75	−15,18	0,174	−1,94	0,800
1,00	−18,35	0,121	−0,78	0,915
1,25	−21,62	0,0830	−0,11	0,987
1,50	−24,94	0,0566	−0,01	0,999
1,75	−28,28	0,0385	−0,52	0,942
2,00	−31,60	0,0263	−1,69	0,823

3. Méthodes existantes pour la prévision du champ

3.1 *La méthode de la FCC*

La méthode de la FCC est basée sur des mesures de courte durée faites au printemps de 1935, année de faible activité solaire. On utilise des courbes qui donnent le champ dépassé pendant 10% et 50% du temps, pour des distances s'échelonnant entre 100 et 2675 miles (environ 169 à 4300 km). Ces courbes sont normalisées par rapport à 100 mV/m à la distance de 1 mile. Elles donnent le champ en fonction de la distance seulement et elles ont été adoptées par la suite pour utilisation en Amérique du Nord, en vertu d'un accord. La méthode donne d'assez bons résultats quand on l'applique à des zones de latitude moyenne (par exemple, le sud des Etats-Unis).

3.2 *Les courbes du Caire*

Sous les auspices du CCIR, plusieurs administrations ont effectué, à la fin des années 1930, des mesures de courte durée entre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud, entre l'Amérique du Nord et l'Europe, etc. Un Groupe de travail a été mis en place, sous la direction du Dr B. van der Pol (Pays-Bas), pour étudier les résultats. Ce Groupe a établi deux courbes distinctes: l'une pour les trajets de propagation passant à grande distance des pôles magnétiques de la Terre (trajets à basse latitude), l'autre pour les trajets passant à proximité de ces pôles (trajets à latitude élevée). La première de ces courbes est mieux connue sous le nom de courbe nord-sud du Caire, parce qu'elle a été établie à partir de mesures faites sur des trajets transéquatoriaux; la seconde est appelée courbe est-ouest du Caire, parce qu'elle a été établie à partir des mesures faites à travers l'océan Atlantique. Ces courbes ont été officiellement adoptées par le CCIR lors d'une réunion tenue au Caire en 1938; c'est la raison pour laquelle elles portent le nom de courbes du Caire.

La Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques (Régions 1 et 3) (Genève, 1975), a adopté la courbe nord-sud du Caire pour utilisation officielle en Asie. Des mesures de champ effectuées par l'Union de radiodiffusion Asie-Pacifique (ABU) montrent que la courbe du Caire est préférable pour cette partie du monde (faibles latitudes géomagnétiques). On a signalé également que, pour les trajets très longs, la courbe du Caire donne, en général, la prévision du champ la plus élevée.

Si on les convertit aux mêmes conditions, les deux courbes du Caire et celle de la FCC sont très semblables pour les distances inférieures ou égales à 1400 km environ. A 3000 km, la courbe nord-sud (basses latitudes) a des ordonnées supérieures de quelque 8 dB à celles de la courbe est-ouest. La différence passe à 18 dB pour une distance de 5000 km. La courbe de la FCC (50%) correspond à peu près à la moyenne des deux courbes du Caire.

3.3 *La méthode du CCIR – Simplification pour les besoins de la planification dans la Région 2*

Conscient de la nécessité d'avoir une méthode simple de prévision du champ d'application mondiale, le CCIR a instauré en 1966 un Groupe de travail *ad hoc*, le Groupe de travail intérimaire 6/4. En 1974, sous la présidence du Dr P. Knight (Royaume-Uni), le GTI 6/4 a adopté la méthode de l'URSS en lui apportant des modifications (par exemple, l'introduction du terme de gain dû à la proximité de la mer, proposé par le Royaume-Uni). Le CCIR recommande l'emploi de cette méthode à titre provisoire. En 1975, la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques a adopté cette méthode pour utilisation officielle dans la Région 1 et dans une partie de la Région 3.

Comparée à des résultats de mesure obtenus dans différentes parties de la Région 2, la méthode du CCIR donne de meilleurs résultats globaux que les courbes de la FCC. Qualitativement, cependant, un certain nombre de limitations sont apparues. Ce sont, en résumé, les suivantes:

- la méthode a tendance à sous-estimer les niveaux du champ dans les zones de basse latitude et à les surestimer dans les zones de latitude élevée;
- des mesures faites en Amérique du Nord donnent à penser que, toutes choses égales d'ailleurs, le champ a tendance à être d'autant plus fort que la fréquence transmise sur le trajet est plus élevée. Or, le terme de la formule du CCIR qui dépend de la fréquence intervient dans le sens opposé;
- pour les trajets de très grande longueur, la méthode a tendance à sous-estimer les niveaux du champ.

Pour préparer la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2) (Buenos Aires, 1980), le GTI 6/4 du CCIR a tenu une réunion spéciale à Genève (octobre 1979). A cette occasion, il a adopté une série de modifications à la méthode du CCIR. Ces modifications, qui avaient pour objet de mieux adapter la méthode du CCIR au contexte de la Région 2, étaient les suivantes:

3.3.1 Pour appliquer la formule du CCIR au champ de l'onde ionosphérique, on utilise 1000 kHz, quelle que soit la fréquence. Cela permet non seulement de simplifier le calcul, mais aussi d'harmoniser les différences observées dans diverses régions en ce qui concerne l'influence de la fréquence.

3.3.2 Le coefficient d'affaiblissement, k, de la méthode du CCIR a été modifié de telle manière que la précision dans les zones de latitude élevée et de basse latitude se trouve améliorée, sans compromettre la prévision dans les zones de latitude moyenne.

3.3.3 Aux fins de la planification, on admet que le nombre de taches solaires est nul.

3.3.4 Il faut souligner que ces modifications découlent d'études portant sur les données recueillies dans différentes parties de la Région 2. Il y a lieu de mentionner que cette méthode présente une grande souplesse et qu'elle pourrait être encore simplifiée. Par exemple, on peut faire abstraction du gain dû à la proximité de la mer et de l'affaiblissement par couplage de polarisation, si tel est le souhait des administrations. La description de la version simplifiée de la méthode du CCIR se trouve dans le Rapport 575, § 7 (voir l'Annexe II au présent Rapport).

3.4 *La méthode de la Région 2 (535-1605 kHz)*

La première session de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2) (Buenos Aires, mars 1980) a procédé à un examen de toutes les méthodes disponibles et a pris les décisions suivantes:

- la version métrique de la courbe de la FCC, normalisée par rapport à un champ caractéristique de 100 mV/m à 1 km, doit être utilisée pour les trajets de longueur inférieure ou égale à 4250 km;
- pour les trajets de longueur supérieure à 4250 km, on utilisera la courbe nord-sud du Caire, convertie à 100 mV/m à 1 km et «abaissée» de 5,4 dB. Etant ainsi abaissée, la courbe du Caire coupe «doucement» celle de la FCC à 4250 km. Cette courbe composite FCC/Le Caire a été adoptée pour la première fois par le Comité technique permanent II de la Conférence interaméricaine des télécommunications (PTC II/CITEL) lors d'une réunion tenue à Brasilia, Brésil (juillet 1979) sous la présidence de M. C. Romero (Pérou);
- la première session a décidé de ne pas adopter le facteur de gain dû à la proximité de la mer. Au lieu de cela, elle a invité, par sa Recommandation C, le CCIR à poursuivre les études. Par contre, le facteur d'affaiblissement par couplage de polarisation, repris de la méthode du CCIR, a été adopté par la première session, mais il a été éliminé par la seconde session (Rio de Janeiro, novembre-décembre 1981) pour des raisons de simplicité. Par ailleurs, la seconde session a décidé que, pour le calcul du brouillage interrégional, on utiliserait la moyenne arithmétique des champs, calculés selon la méthode officielle de la Région 2 et selon la méhode décrite dans la Recommandation 435 du CCIR.

Des renseignements détaillés sur cette méthode sont donnés dans les Actes finals de Rio et dans l'Annexe I au présent Rapport.

3.5 *La méthode de la FCC modifiée*

Etant donné les limitations intrinsèques de l'actuelle méthode de la FCC (donc aussi de la méthode de la Région 2) et en vue de préparer la première session de la Conférence administrative régionale chargée de la préparation d'un plan de radiodiffusion dans la bande 1605-1705 kHz dans la Région 2 (BC-R2(1)), Genève, 1986, le GTI 6/4 a élaboré un nouveau terme qui dépend de la latitude. L'application de la méthode de la Région 2 décrite dans les Actes finals de Rio, complétée par ce terme, a les particularités suivantes:

3.5.1 La méthode modifiée est simple à employer, il suffirait d'avoir une calculatrice de poche. Dans de nombreux cas, on pourrait se contenter d'un crayon et d'une règle. Il est inutile d'utiliser un ordinateur.

3.5.2 La méthode modifiée est entièrement compatible avec le modèle existant. Les programmes d'ordinateur utilisés par les administrations et l'IFRB sont très faciles à modifier.

3.5.3 La méthode modifiée tient compte de l'influence de la latitude, grâce à l'utilisation de la latitude géomagnétique moyenne, Φ, du trajet considéré. La conversion des coordonnées géographiques en coordonnées géomagnétiques ne présente pas de difficulté (voir, par exemple, la Fig. 16 de l'Annexe I à la Recommandation 435).

3.5.4 La courbe correspondant à $\Phi = 35°$ est très proche de la courbe nord-sud du Caire. La différence est de l'ordre de 1,5 dB si l'on considère les valeurs quadratiques moyennes.

3.5.5 La courbe correspondant à $\Phi = 45°$ est semblable à la courbe actuelle utilisée pour la Région 2, laquelle est la version métrique de la courbe de la FCC. L'écart entre la courbe de la Région 2 et la nouvelle courbe modifiée, pour $\Phi = 45°$, est d'environ 2,5 dB, si l'on considère les valeurs quadratiques moyennes.

3.5.6 La courbe pour $\Phi = 59°$ a été adoptée par la FCC pour utilisation entre l'Alaska et les 48 Etats contigus des Etats-Unis d'Amérique.

4. Comparaison des méthodes de prévision

On a étudié les données relatives aux trajets de propagation situés à l'intérieur de la Région 2 et à des trajets interrégionaux. Les données pour la Région 2 ont été réparties en trois groupes, selon les latitudes géomagnétiques des points milieux. Pour les trajets à latitude moyenne et à latitude élevée, on a considéré uniquement les champs mesurés pendant une année de faible activité solaire (données correspondant au cas le plus défavorable). Le Tableau II récapitule les erreurs de prévision commises avec les différentes méthodes indiquées dans le présent Rapport. Dans cette étude, une erreur est définie comme la différence, en décibels, entre le champ calculé et le champ mesuré.

TABLEAU II – *Erreurs de prévision*

Cas	Erreurs quadratiques moyennes pour les différentes méthodes				Zones géographiques où les mesures ont été effectuées
	A (dB)	B (dB)	C (dB)	D (dB)	
0°-44,9°	9,9	7,8	7,7	8,2	BR, MEX, USA, USA-ARG, Amérique centrale-USA
45°-52,5°	4,7	6,0	4,1	5,8	USA
> 52,5°	11,1	13,4	4,6	6,8	USA, CAN-USA
Sous-total	8,1	8,7	5,4	6,9	
Trajets interrégionaux	13,6	17,2	11,1	8,9	Toutes les régions de l'UIT
Total	10,97	13,96	8,51	8,05	

A: méthode de la Région 2
B: courbes du Caire
C: méthode du CCIR simplifiée
D: méthode de la FCC modifiée

Une étude attentive des résultats de cette comparaison, compte tenu des résultats fournis par des travaux antérieurs (voir le Rapport 431), conduit aux conclusions suivantes:

4.1 Comme on pouvait le prévoir, la méthode de la Région 2 donne de bons résultats dans les zones de latitude moyenne de la Région. En revanche, si on l'applique dans des zones de basse latitude, on obtient généralement une sous-estimation des champs et, dans des zones de latitude élevée, presque toujours une surestimation. Du point de vue de la gestion des fréquences, cela signifie que, dans les zones de basse latitude, les contours du champ de l'onde ionosphérique, pour une valeur donnée du niveau du signal calculé selon la méthode de la Région 2, sont généralement beaucoup plus petits que les contours réels. En revanche, les contours calculés dans les zones de latitude élevée sont généralement beaucoup plus étendus que les contours réels.

4.2 On peut dire à peu près la même chose pour la courbe du Caire, à ceci près que son imprécision, dans le cas des zones de latitude élevée, est plus évidente. Il convient de préciser que cette courbe donne toujours de bons résultats quand on l'applique à des trajets maritimes de grande longueur.

4.3 La méthode simplifiée du CCIR donne des résultats prometteurs pour la planification dans la Région 2. Si l'on fait la comparaison avec les données de mesure recueillies dans cette Région, elle fait apparaître une meilleure concordance avec les observations, ce qui n'est pas le cas avec les autres méthodes. Elle donne aussi d'assez bons résultats globaux si on fait la comparaison avec les mesures effectuées sur des trajets interrégionaux. On a signalé cependant que, si on l'applique à des trajets de longueur supérieure à 4000 km, par exemple, cette méthode a tendance à sous-estimer les niveaux des champs.

4.4 Comme la méthode simplifiée du CCIR, la méthode de la FCC modifiée contient un terme qui dépend de la latitude. Contrairement à la méthode simplifiée du CCIR, elle semble donner de bons résultats aussi bien pour les trajets longs que pour les trajets courts. La méthode de la FCC modifiée établit un lien entre la courbe du Caire et la courbe de la FCC.

5. Conclusions

Au vu des études les plus récentes sur l'influence de la fréquence, la méthode de la Région 2, telle qu'elle est décrite dans les Actes finals de Rio, pour calculer les champs nocturnes de l'onde ionosphérique dans la bande 535-1605 kHz, peut être étendue jusqu'à 1705 kHz sans introduire d'erreurs supplémentaires notables (pour plus de détails sur cette méthode, voir l'Annexe I).

Si les administrations de la Région 2 ont une préférence pour une méthode un peu plus perfectionnée, afin d'améliorer l'exactitude de la prévision, elles ont le choix entre deux autres méthodes. Il conviendrait d'envisager l'emploi de la méthode du CCIR simplifiée pour la planification dans la Région 2 (voir l'Annexe II) et de la méthode de la FCC modifiée (voir l'Annexe III).

ANNEXE I

MÉTHODE DE LA RÉGION 2

Le calcul du champ de l'onde ionosphérique s'effectue conformément aux dispositions suivantes. (Dans l'Accord, le gain dû à la proximité de la mer et les pertes par couplage de polarisation ne sont pas pris en compte.)

Liste des symboles

d : distance (en km) mesurée sur le petit arc du grand cercle;

E_c : champ caractéristique (mV/m à 1 km pour 1 kW);

$f(\theta)$: rayonnement exprimé sous forme de fraction de sa valeur pour $\theta = 0$ (lorsque $\theta = 0$, $f(\theta) = 1$);

f: fréquence en kHz;

F: champ médian annuel de l'onde ionosphérique, sans correction, en dB(μV/m);

F_c : champ lu sur la Fig. 6 et sur le Tableau V pour un champ caractéristique de 100 mV/m;

P: puissance de la station, (kW);

θ : angle de site par rapport au plan horizontal, en degrés.

Méthode générale

Le rayonnement dans le plan horizontal d'une antenne équidirective alimentée par une puissance d'un kilowatt (champ caractéristique E_c) est obtenu à partir des données nominales ou, si celles-ci ne sont pas connues, à partir des Fig. 2 et 3.

L'angle de site θ est donné par la formule:

$$\theta = \text{arc tg}\left(0{,}00752 \operatorname{cotg} \frac{d}{444{,}54}\right) - \frac{d}{444{,}54} \quad \text{degrés} \quad \text{pour } 0° \leqslant \theta \leqslant 90° \qquad (3)$$

On peut aussi utiliser la Fig. 4 ou le Tableau III.

On admet que la Terre est une sphère régulière de 6367,6 km de rayon et que la réflexion se produit sur l'ionosphère à une altitude de 96,5 km.

On peut déterminer le rayonnement $f(\theta)$ sous l'angle de site considéré θ (exprimé sous forme de fraction de sa valeur pour $\theta = 0$) au moyen de la Fig. 5 ou du Tableau IV.

Pour une antenne équidirective, on peut de cette manière déterminer le produit $E_c f(\theta)\sqrt{P}$. Pour une antenne directive, $E_c f(\theta)\sqrt{P}$ peut être déterminé à partir du diagramme de rayonnement. $E_c f(\theta)\sqrt{P}$ est le champ à 1 km sous l'angle de site et dans l'azimut correspondants.

Le champ médian annuel de l'onde ionosphérique sans correction, F, est donné par la formule:

$$F = F_c + 20 \log \frac{E_c f(\theta)\sqrt{P}}{100} \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{4}$$

dans laquelle F_c est la valeur lue directement sur la courbe de champ de la Fig. 6 ou sur le Tableau V.

Note. – Dans la Fig. 6 et dans le Tableau V, les valeurs de F_c sont normalisées à 100 mV/m à 1 km, ce qui correspond à une puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.) de −9,5 dB(kW).

Il convient d'observer que, pour des distances supérieures à 4250 km, F_c peut être exprimée de la façon suivante:

$$F_c = \frac{231}{3 + d/1000} - 35{,}5 \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{5}$$

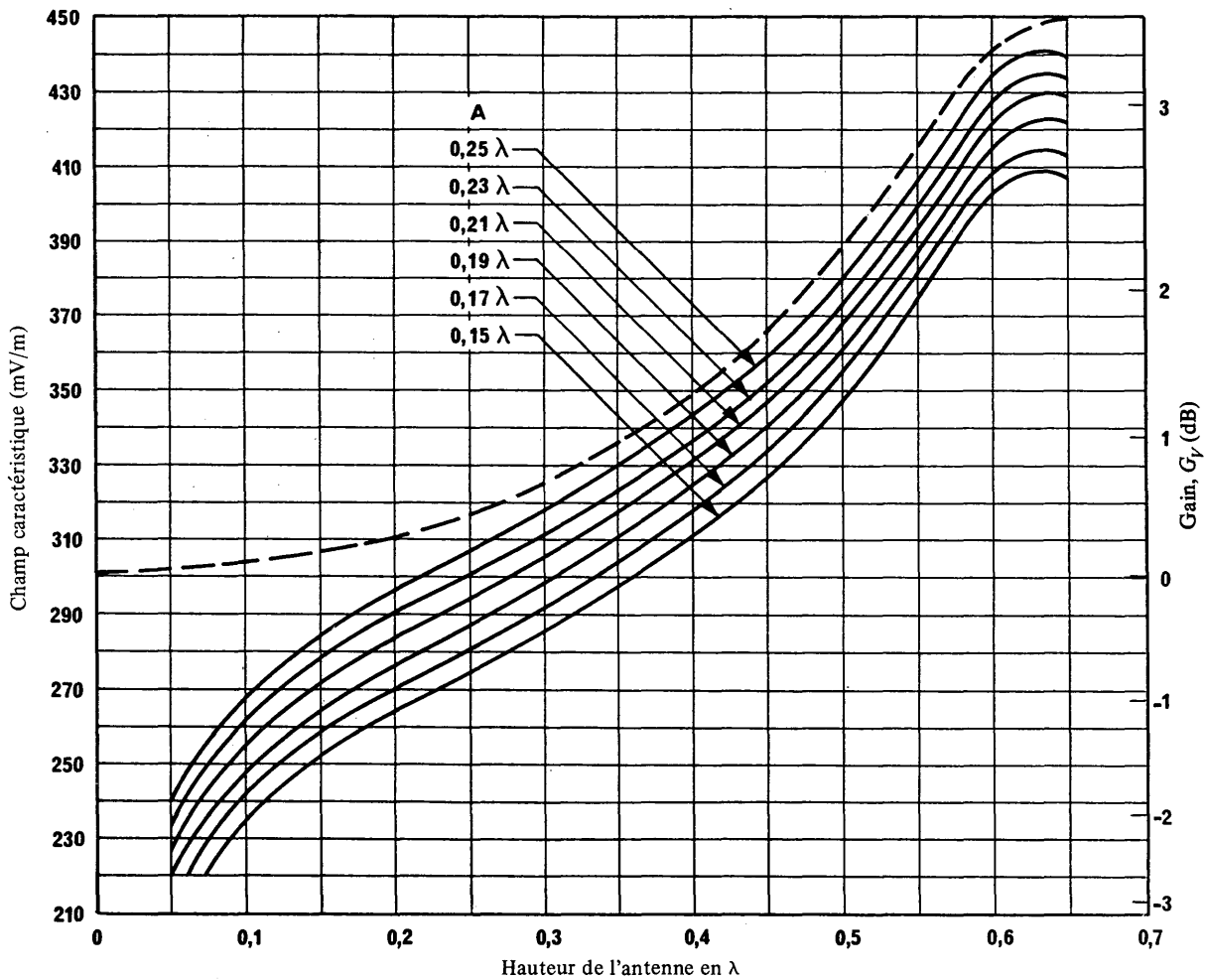


FIGURE 2 – *Champ caractéristique pour des antennes verticales simples avec un réseau de terre à 120 rayons*

A: rayon du réseau de terre

——— antenne réelle correctement conçue

– – – antenne idéale sur un sol de conductivité parfaite

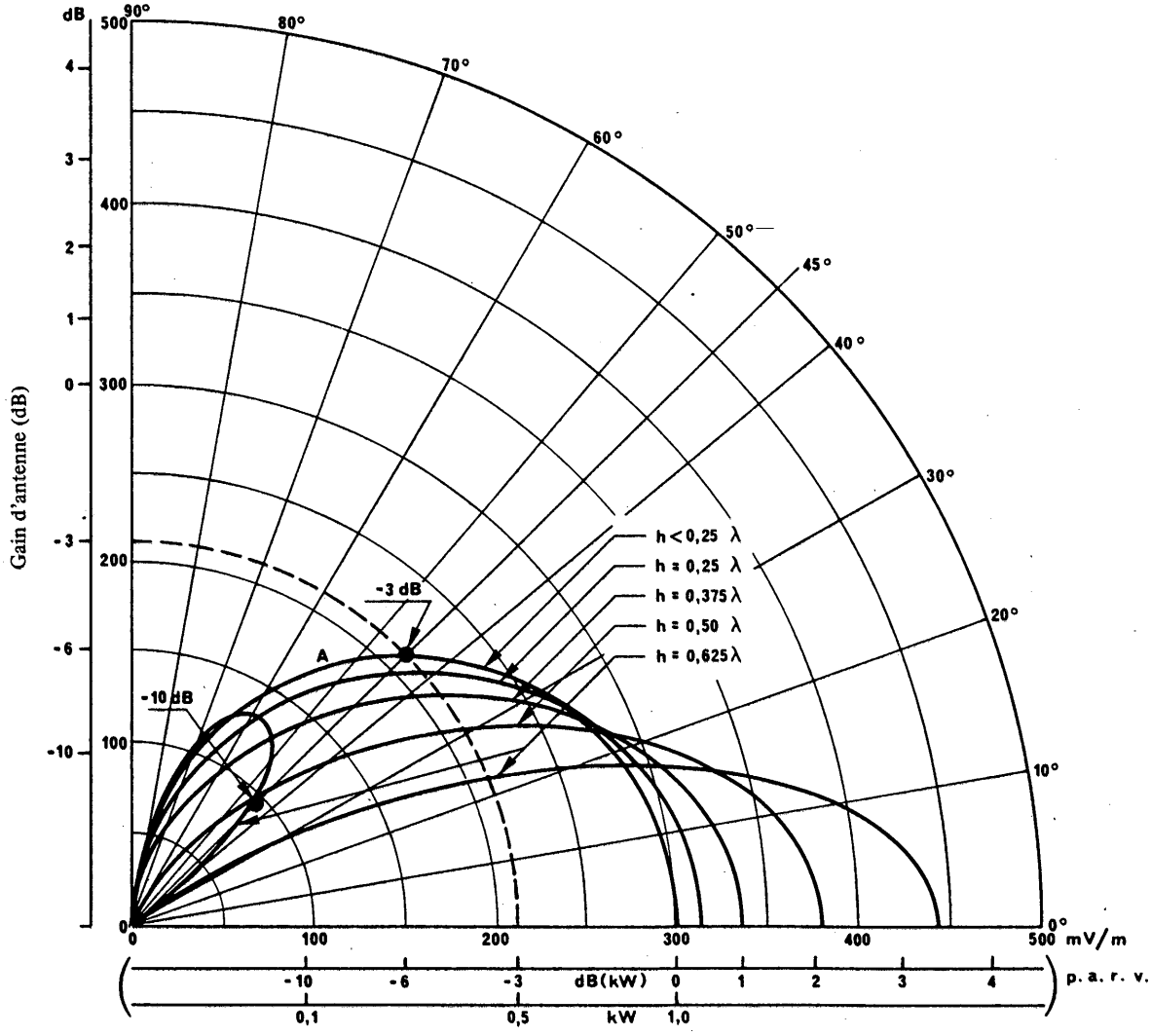


FIGURE 3 – *Puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.) et champ à 1 km en fonction de l'angle de site, pour des antennes verticales de différentes hauteurs, en admettant une puissance d'émission de 1 kW*

A: antenne verticale courte

TABLEAU III – *Angle de site en fonction de la distance*

Distance (km)	Angle de site (degrés)	Distance (km)	Angle de site (degrés)
50	75,3	1250	5,9
100	62,2	1300	5,4
150	51,6	1350	5,0
200	43,3	1400	4,6
250	36,9	1450	4,3
300	31,9	1500	3,9
350	27,9	1550	3,5
400	24,7	1600	3,2
450	22,0	1650	2,9
500	19,8	1700	2,6
550	18,0	1750	2,3
600	16,3	1800	2,0
650	14,9	1850	1,7
700	13,7	1900	1,5
750	12,6	1950	1,2
800	11,7	2000	1,0
850	10,8	2050	0,7
900	10,0	2100	0,5
950	9,3	2150	0,2
1000	8,6	2200	0,0
1050	8,0	2250	0,0
1100	7,4	2300	0,0
1150	6,9	2350	0,0
1200	6,4	2400	0,0

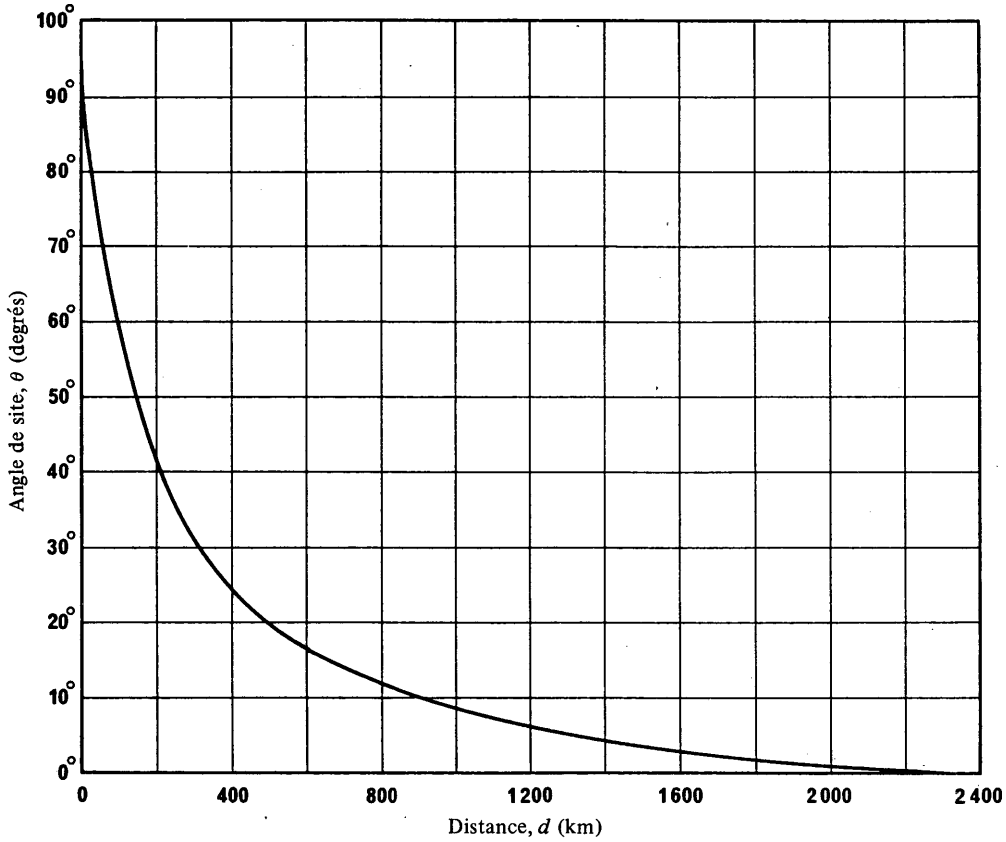


FIGURE 4 – *Angle de site en fonction de la distance*

$$\theta = \text{arc tg}\left[0{,}00752 \text{ cotg } \frac{d}{444{,}54}\right] - \frac{d}{444{,}54}$$

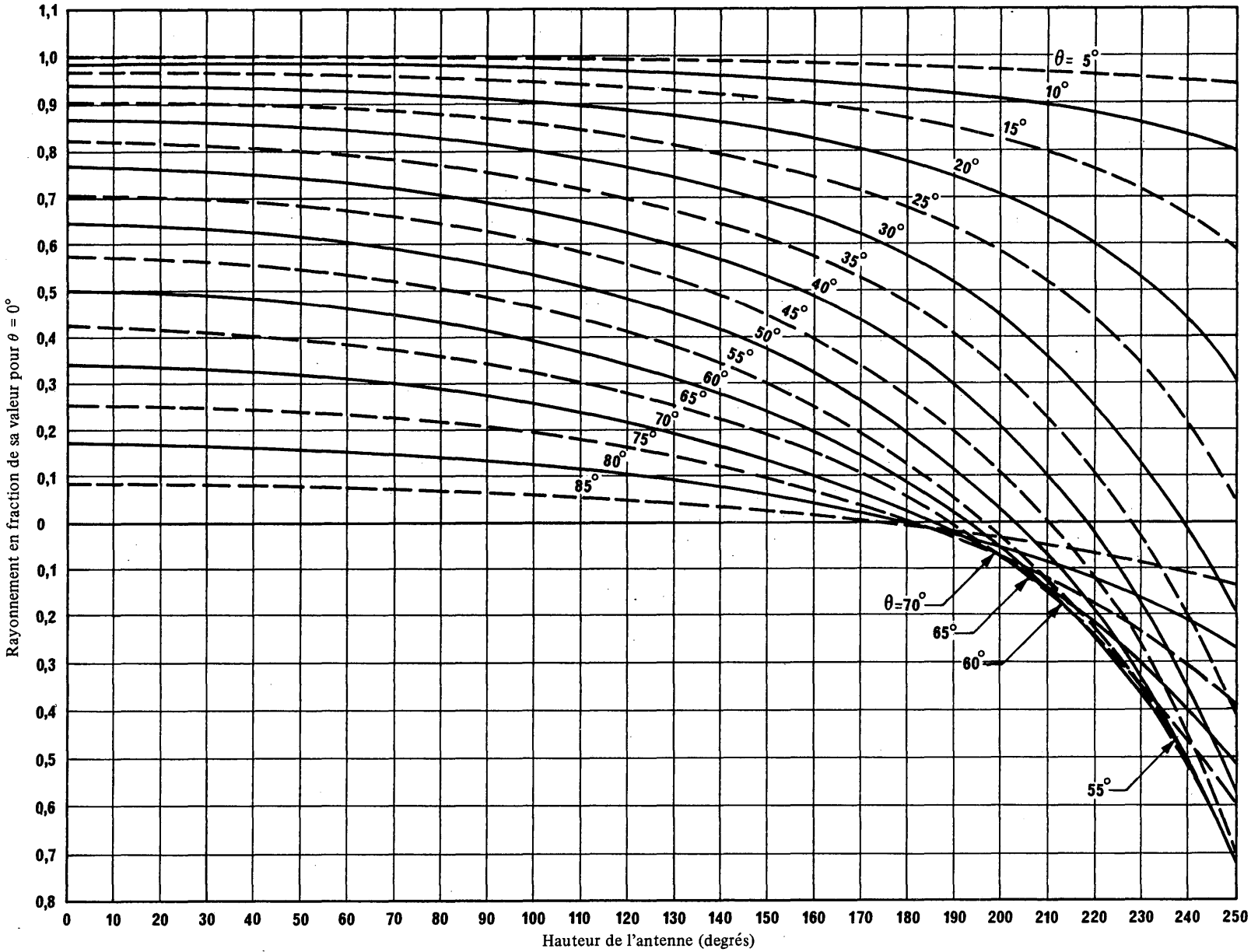


FIGURE 5 – *Rayonnement dans le plan vertical en fonction de la hauteur électrique du pylône pour plusieurs valeurs de l'angle de site (θ) pour des antennes verticales simples*

TABLEAU IV – *Valeurs de $f(\theta)$ pour des antennes verticales simples*

Angle de site (degrés)	$f(\theta)$					
	0,11 λ	0,13 λ	0,15 λ	0,17 λ	0,19 λ	0,21 λ
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
3	0,999	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
4	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
5	0,996	0,996	0,996	0,995	0,995	0,995
6	0,994	0,994	0,994	0,993	0,993	0,993
7	0,992	0,992	0,991	0,991	0,991	0,990
8	0,989	0,989	0,989	0,988	0,988	0,987
9	0,987	0,986	0,986	0,985	0,985	0,984
10	0,984	0,983	0,983	0,982	0,981	0,980
11	0,980	0,980	0,979	0,978	0,977	0,976
12	0,976	0,976	0,975	0,974	0,973	0,971
13	0,972	0,972	0,971	0,969	0,968	0,967
14	0,968	0,967	0,966	0,965	0,963	0,961
15	0,963	0,962	0,961	0,959	0,958	0,956
16	0,958	0,957	0,956	0,954	0,952	0,950
17	0,953	0,952	0,950	0,948	0,945	0,943
18	0,947	0,946	0,944	0,942	0,940	0,937
19	0,941	0,940	0,938	0,935	0,933	0,930
20	0,935	0,933	0,931	0,929	0,926	0,922
22	0,922	0,920	0,917	0,914	0,911	0,907
24	0,907	0,905	0,902	0,898	0,894	0,890
26	0,892	0,889	0,885	0,882	0,877	0,872
28	0,875	0,872	0,868	0,864	0,858	0,852
30	0,857	0,854	0,849	0,844	0,839	0,832
32	0,838	0,834	0,830	0,824	0,818	0,811
34	0,819	0,814	0,809	0,803	0,795	0,789
36	0,798	0,793	0,788	0,781	0,774	0,766
38	0,776	0,771	0,765	0,758	0,751	0,742
40	0,753	0,748	0,742	0,735	0,725	0,717
42	0,730	0,724	0,718	0,710	0,702	0,692
44	0,705	0,700	0,693	0,685	0,676	0,666
46	0,680	0,674	0,667	0,659	0,650	0,639
48	0,654	0,648	0,641	0,633	0,623	0,612
50	0,628	0,621	0,614	0,606	0,596	0,585
52	0,600	0,594	0,587	0,578	0,568	0,557
54	0,572	0,566	0,559	0,550	0,540	0,529
56	0,544	0,537	0,530	0,521	0,512	0,501
58	0,515	0,508	0,501	0,493	0,483	0,472
60	0,485	0,479	0,472	0,463	0,454	0,443

TABLEAU IV *(suite)*

Angle de site (degrés)	$f(\theta)$					
	0,23 λ	0,25 λ	0,27 λ	0,29 λ	0,311 λ	0,35 λ
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
3	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997
4	0,997	0,996	0,996	0,996	0,996	0,995
5	0,995	0,994	0,994	0,994	0,993	0,992
6	0,992	0,992	0,991	0,991	0,990	0,989
7	0,990	0,989	0,988	0,988	0,987	0,985
8	0,987	0,986	0,985	0,984	0,983	0,980
9	0,983	0,982	0,981	0,980	0,978	0,975
10	0,979	0,978	0,977	0,975	0,973	0,969
11	0,975	0,973	0,972	0,970	0,968	0,963
12	0,970	0,968	0,966	0,964	0,962	0,955
13	0,965	0,963	0,961	0,958	0,955	0,949
14	0,959	0,957	0,955	0,952	0,948	0,941
15	0,953	0,951	0,948	0,945	0,941	0,932
16	0,947	0,944	0,941	0,937	0,933	0,924
17	0,941	0,937	0,934	0,930	0,925	0,914
18	0,934	0,930	0,926	0,921	0,916	0,904
19	0,926	0,922	0,918	0,913	0,907	0,894
20	0,919	0,914	0,909	0,904	0,898	0,883
22	0,902	0,897	0,891	0,885	0,877	0,861
24	0,885	0,879	0,872	0,865	0,856	0,837
26	0,866	0,859	0,852	0,843	0,833	0,811
28	0,846	0,833	0,830	0,820	0,809	0,795
30	0,825	0,816	0,807	0,797	0,784	0,758
32	0,803	0,794	0,784	0,772	0,759	0,729
34	0,780	0,770	0,759	0,747	0,732	0,701
36	0,756	0,746	0,734	0,721	0,705	0,671
38	0,732	0,720	0,708	0,694	0,677	0,642
40	0,706	0,695	0,681	0,667	0,649	0,612
42	0,681	0,668	0,654	0,639	0,621	0,582
44	0,654	0,641	0,627	0,611	0,593	0,552
46	0,628	0,614	0,600	0,583	0,564	0,523
48	0,600	0,587	0,572	0,555	0,536	0,494
50	0,573	0,559	0,544	0,527	0,507	0,465
52	0,545	0,531	0,515	0,498	0,479	0,436
54	0,517	0,503	0,487	0,470	0,451	0,408
56	0,488	0,474	0,459	0,442	0,423	0,381
58	0,460	0,446	0,431	0,414	0,395	0,354
60	0,431	0,418	0,403	0,387	0,368	0,328

TABLEAU IV *(fin)*

Angle de site (degrés)	$f(\theta)$					
	0,40 λ	0,45 λ	0,50 λ	0,528 λ	0,55 λ	0,625 λ
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999	0,999
2	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,995
3	0,997	0,996	0,995	0,994	0,993	0,989
4	0,994	0,992	0,990	0,989	0,988	0,981
5	0,991	0,988	0,985	0,983	0,981	0,970
6	0,986	0,983	0,979	0,975	0,972	0,957
7	0,982	0,977	0,971	0,967	0,962	0,941
8	0,976	0,970	0,962	0,957	0,951	0,924
9	0,970	0,963	0,953	0,945	0,938	0,904
10	0,963	0,954	0,942	0,933	0,924	0,882
11	0,955	0,945	0,930	0,919	0,909	0,859
12	0,947	0,934	0,917	0,905	0,893	0,834
13	0,938	0,923	0,903	0,889	0,875	0,807
14	0,929	0,912	0,889	0,872	0,857	0,773
15	0,918	0,899	0,873	0,855	0,837	0,748
16	0,908	0,886	0,857	0,836	0,815	0,717
17	0,897	0,873	0,840	0,817	0,795	0,684
18	0,885	0,859	0,823	0,797	0,772	0,651
19	0,873	0,844	0,804	0,776	0,749	0,617
20	0,860	0,828	0,785	0,755	0,726	0,582
22	0,833	0,796	0,746	0,710	0,677	0,510
24	0,805	0,763	0,705	0,665	0,625	0,436
26	0,776	0,728	0,663	0,618	0,574	0,363
28	0,745	0,692	0,621	0,570	0,522	0,290
30	0,714	0,655	0,577	0,522	0,470	0,219
32	0,682	0,619	0,534	0,475	0,419	0,151
34	0,649	0,582	0,492	0,428	0,368	0,085
36	0,617	0,545	0,450	0,383	0,321	0,025
38	0,584	0,509	0,409	0,340	0,275	−0,031
40	0,552	0,473	0,370	0,298	0,231	−0,083
42	0,519	0,438	0,332	0,258	0,190	−0,129
44	0,488	0,405	0,296	0,221	0,152	−0,170
46	0,457	0,372	0,262	0,187	0,117	−0,205
48	0,427	0,341	0,230	0,155	0,085	−0,235
50	0,397	0,311	0,201	0,126	0,056	−0,259
52	0,369	0,283	0,174	0,099	0,031	−0,278
54	0,341	0,257	0,149	0,076	0,009	−0,291
56	0,315	0,232	0,126	0,055	−0,010	−0,300
58	0,289	0,208	0,105	0,037	−0,026	−0,304
60	0,265	0,186	0,087	0,021	−0,039	−0,304
62				0,003	−0,049	−0,300
64				−0,003	−0,056	−0,292
66				−0,011	−0,062	−0,281
68				−0,017	−0,064	−0,267
70				−0,022	−0,065	−0,250
72				−0,025	−0,064	−0,231
74				−0,026	−0,061	−0,210
76				−0,026	−0,056	−0,138
78				−0,024	−0,051	−0,163
80				−0,022	−0,044	−0,138

Note. – Dans le tableau, le signe négatif (−) indique seulement l'existence d'un lobe secondaire de phase opposée à celle du lobe principal dans le diagramme de rayonnement vertical. Pour les calculs, il ne faut pas tenir compte de ce signe: utiliser seulement la valeur absolue $f(\theta)$ indiquée dans le tableau.

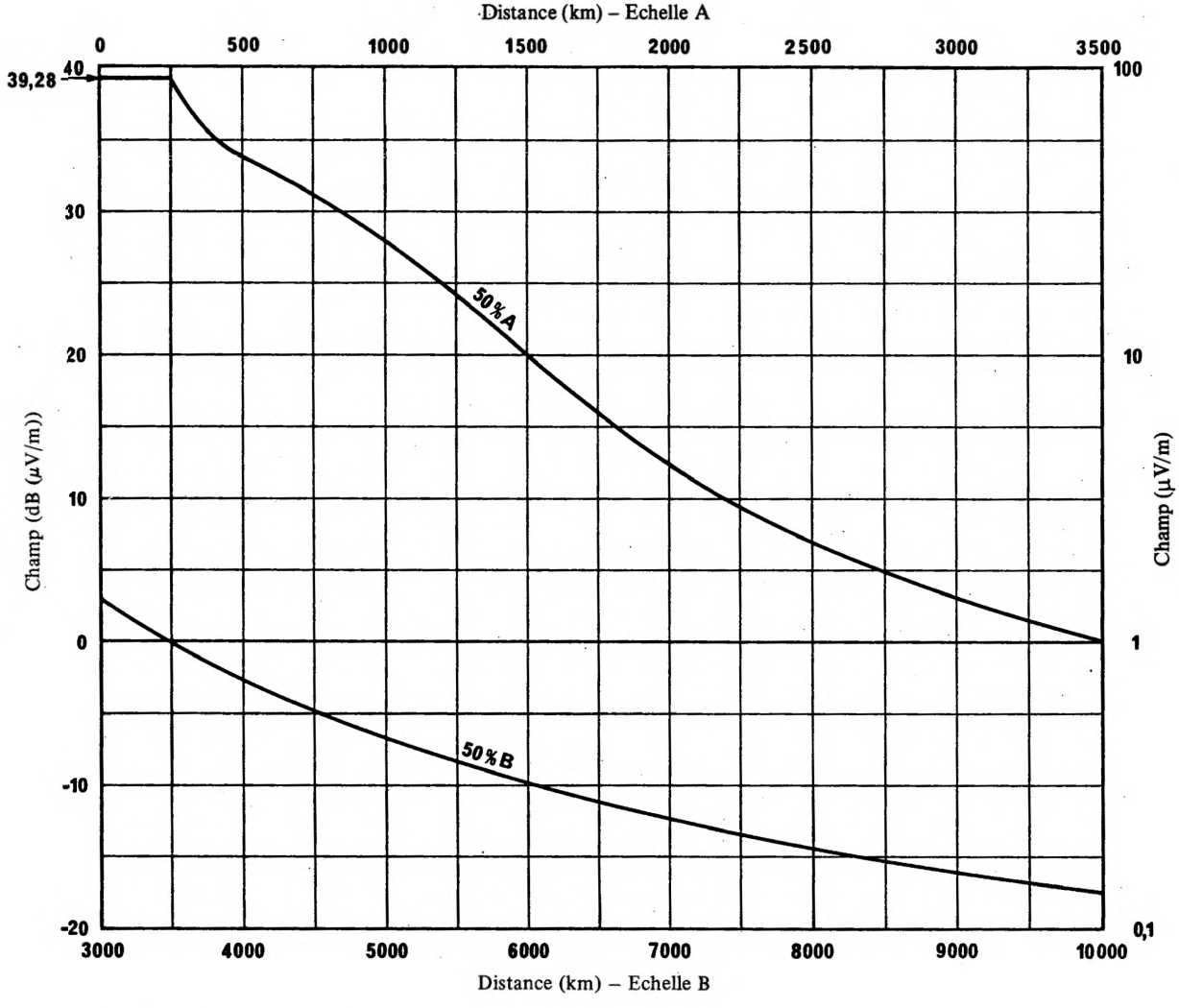


FIGURE 6 – *Champ de l'onde ionosphérique en fonction de la distance pour un champ caractéristique de 100 mV/m*

TABLEAU V – *Champ de l'onde ionosphérique en fonction de la distance (de 100 à 10 000 km) pour un champ caractéristique de 100 mV/m*

d (km)	F_c (dB(μV/m)) 50%	F_c (μV/m) 50%	*d* (km)	F_c (dB(μV/m)) 50%	F_c (μV/m) 50%
0-200	39,28	92,06	3300	1,18	1,15
250	37,79	77,54	3400	0,57	1,07
300	36,75	68,82	3500	0,02	1,00
350	35,86	62,06	3600	−0,53	0,94
400	35,13	57,08	3700	−1,08	0,88
450	34,46	52,86	3800	−1,59	0,83
500	33,92	49,45	3900	−2,08	0,79
550	33,40	46,78	4000	−2,52	0,75
600	32,94	41,36	4100	−3,01	0,71
650	32,45	41,95	4200	−3,46	0,67
700	31,94	39,54	4300	−3,90	0,64
750	31,32	36,81	4400	−4,33	0,61
800	30,73	34,40	4500	−4,74	0,58
850	30,18	32,30	4600	−5,15	0,55
900	29,51	29,89	4700	−5,54	0,53
950	28,83	27,63	4800	−5,93	0,51
1000	28,14	25,54	4900	−6,30	0,48
1050	27,44	23,56	5000	−6,67	0,46
1100	26,79	21,84	5100	−7,02	0,45
1150	25,98	19,91	5200	−7,37	0,43
1200	25,25	18,30	5300	−7,71	0,41
1250	24,50	16,78	5400	−8,04	0,40
1300	23,71	15,32	5500	−8,37	0,38
1350	22,90	13,97	5600	−8,68	0,37
1400	22,08	12,71	5700	−8,99	0,36
1450	21,25	11,55	5800	−9,29	0,34
1500	20,42	10,50	5900	−9,59	0,33
1550	19,59	9,53	6000	−9,88	0,32
1600	18,66	8,57	6200	−10,43	0,30
1650	17,75	7,72	6400	−10,97	0,28
1700	16,87	6,98	6600	−11,48	0,27
1750	16,04	6,34	6800	−11,97	0,25
1800	15,28	5,80	7000	−12,44	0,24
1850	14,52	5,32	7200	−12,90	0,23
1900	13,78	4,89	7400	−13,33	0,22
1950	13,05	4,49	7600	−13,75	0,21
2000	12,34	4,14	7800	−14,15	0,20
2100	11,15	3,61	8000	−14,54	0,19
2200	10,05	3,18	8200	−14,92	0,18
2300	8,92	2,79	8400	−15,28	0,17
2400	8,13	2,55	8600	−15,63	0,17
2500	7,09	2,26	8800	−15,97	0,16
2600	6,16	2,03	9000	−16,29	0,15
2700	5,32	1,85	9200	−16,61	0,15
2800	4,58	1,69	9400	−16,91	0,14
2900	3,81	1,55	9600	−17,21	0,14
3000	3,11	1,43	9800	−17,50	0,13
3100	2,45	1,33	10000	−17,77	0,13
3200	1,78	1,23			

ANNEXE II

MÉTHODE SIMPLIFIÉE DU CCIR POUR LA PLANIFICATION DANS LA RÉGION 2

(voir le § 7 du Rapport 575)

Au titre de la préparation d'une Conférence administrative régionale de radiodiffusion (535-1605 kHz, Région 2), le GTI 6/4 a procédé à une étude des méthodes de prévision existantes et des mesures effectuées dans plusieurs parties de la Région 2. Pour répondre à ce besoin, il a apporté quelques simplifications à la méthode décrite dans l'Annexe I à la Recommandation 435. Pour les besoins de la planification, la formule suivante peut être utilisée dans la Région 2:

$$E = V + G_S - L_p + 103 - 20 \log p - 10^{-3}\, kp \qquad (6)$$

où:

V: force cymomotrice de l'émetteur; V a pour expression:

$$V = P + G_V + G_H \qquad (7)$$

P: puissance rayonnée (dB(kW))

G_V: gain d'antenne (dB) dû à la directivité verticale. Pour une antenne équidirective, voir la Fig. 1 de l'Annexe I à la Recommandation 435.

G_H: gain d'antenne (dB) dû à la directivité horizontale.
$G_H = 0$ pour une antenne équidirective.

G_S: gain dû à la proximité de la mer (dB). On peut utiliser la Fig. 2 de l'Annexe I à la Recommandation 435 si l'émetteur ou le récepteur sont situés sur la côte et si la mer n'est pas occultée par un autre segment terrestre. Dans tous les autres cas, voir le § 2.3 de l'Annexe I à la Recommandation 435. Si les extrémités du trajet sont toutes deux situées près de la mer, G_S est la somme des valeurs pour chacune d'elles.

L_p: surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation (dB). Voir les Fig. 11, 12 et 13 de l'Annexe I à la Recommandation 435, l'équation est donnée dans la Fig. 13. L_p doit être évalué séparément pour les deux extrémités et les deux valeurs de L_p doivent être ajoutées.

p: distance oblique (km). Pour les trajets de longueur supérieure à 1000 km, p est égale en première approximation à la distance dans le plan du grand cercle, d. Pour des trajets plus courts:

$$p = (d^2 + 40\,000)^{1/2} \qquad (8)$$

Afin d'éviter toute discontinuité du champ en fonction de la distance, cette formule devra être utilisée dans tous les cas où la gamme des distances concernée comporte des distances inférieures à 1000 km et des distances supérieures à 1000 km.

k: coefficient d'affaiblissement dans l'expression duquel intervient un paramètre de latitude géomagnétique, Φ (voir la Fig. 3 et le § 7 du Rapport 575). Pour des trajets de longueur inférieure à 3000 km, on a:

$$\Phi = \tfrac{1}{2}(\Phi_T + \Phi_R) \qquad (9)$$

Φ_T: latitude géomagnétique* de l'émetteur (degrés)
Φ_R: latitude géomagnétique* du récepteur (degrés)

} voir la Fig. 16 de l'Annexe I à la Recommandation 435

Les latitudes géomagnétiques sont données par l'expression:

$$\Phi_T \text{ ou } \Phi_R = \arcsin\left[\sin\alpha \sin 78{,}5° + \cos\alpha \cos 78{,}5° \cos(69° + \beta)\right] \qquad (10)$$

* Les latitudes sud sont négatives et les latitudes nord positives.

où α et β * sont respectivement la latitude et la longitude de la station terminale. Les trajets de longueur supérieure à 3000 km sont divisés en deux parties égales, que l'on considère séparément. On obtient la valeur de Φ pour chaque demi-trajet en prenant la moyenne des latitudes géomagnétiques d'une station terminale et du point milieu de l'ensemble du trajet, étant admis que la latitude géomagnétique de ce dernier point est la moyenne de Φ_T et de Φ_R. On a donc:

$$\Phi = 0{,}25\ (3\Phi_T + \Phi_R) \text{ pour la première moitié du trajet, et} \tag{11}$$

$$\Phi = 0{,}25\ (\Phi_T + 3\Phi_R) \text{ pour la seconde moitié.} \tag{12}$$

On établit ensuite la moyenne des valeurs de k calculées séparément et on utilise cette moyenne dans l'équation (6).

ANNEXE III

MÉTHODE DE LA FCC MODIFIÉE

Selon le Chapitre 3 de l'Annexe 2 aux Actes finals de Rio, le champ nocturne (2 heures après le coucher du Soleil) de l'onde ionosphérique, pour 50% du temps, a pour expression:

$$F = F_c + 20 \log \frac{E_c f(\theta) \sqrt{P}}{100} \tag{13}$$

(toutes les équations sont en dB(μV/m)).

Pour les distances inférieures à 4250 km, F_c est lu directement sur la Fig. 4 des Actes finals de Rio; il n'existe pas d'équation donnant cette grandeur. Pour les distances plus grandes, F_c peut s'exprimer par:

$$F_c = \frac{231}{3 + d/1000} - 35{,}5 \tag{14}$$

Dans cette méthode (FCC modifiée), il est suggéré que, pour les distances dans le plan du grand cercle (d) supérieures à 200 km, on adopte la formule suivante pour F_c:

$$F_c = (95 - \log d) - (2\pi + 4{,}95\ \mathrm{tg}^2\ \Phi)\ (d/1000)^{1/2} \tag{15}$$

où Φ est la moyenne arithmétique de la latitude géomagnétique de l'émetteur (Φ_T) et de celle du point de réception (Φ_R) d'un trajet. Les latitudes nord sont considérées comme positives, les latitudes sud comme négatives. Si $|\ \Phi\ |$ est plus grand que 60°, on calcule l'équation (15) pour $\Phi = 60°$. Si d est inférieure à 200 km, on évalue F_c pour $d = 200$ km. En revanche, il faut utiliser la valeur effective de d pour déterminer l'angle de départ (voir aussi le § 2.8). Pour déterminer Φ, on peut utiliser la Fig. 16 de l'Annexe I à la Recommandation 435 et les équations (11) et (12) de l'Annexe II. La Fig. 7 donne les valeurs de F_c pour un certain nombre de latitudes.

* Positif pour les coordonnées nord et est, négatif pour les coordonnées sud et ouest.

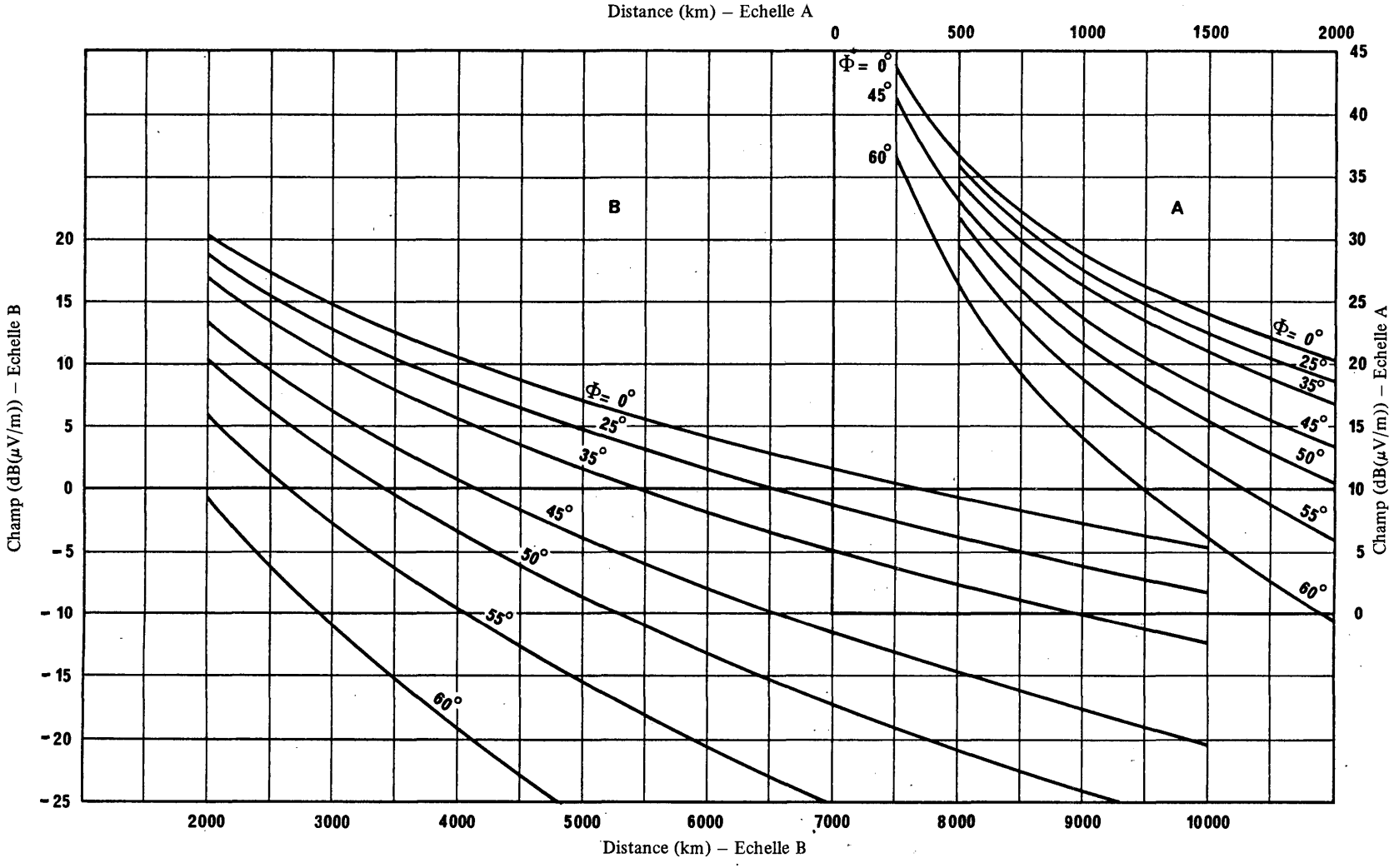


FIGURE 7 – *Champ de l'onde ionosphérique en fonction de la distance (100 mV/m à 1 km, 50%, 2 heures après le coucher du Soleil)*

$$F_c = (95 - 20 \log d) - (2\pi + 4{,}95 \text{ tg}^2 \Phi)\,(d/1000)^{1/2}$$

RAPPORT 1015*

MÉTHODE DE PRÉVISION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE POUR LA PROPAGATION VERS LES AÉRONEFS A 500 kHz

(Question 31/6, Programme d'études 31D/6)

(1986)

1. Introduction

La Question 53-2/8, relative à l'utilisation par le service mobile maritime de fréquences dans la bande 435-526,5 kHz, demande, entre autres choses, quels sont les critères de partage avec d'autres services, compte tenu des modes de propagation pour une antenne de réception située bien au-dessus du niveau du sol. On trouvera dans le présent Rapport une méthode proposée pour la prévision du champ de l'onde ionosphérique, fondée sur la méthode décrite dans la Recommandation 435 pour des récepteurs placés très près du sol. On trouvera des renseignements sur la précision de la méthode donnée dans la Recommandation 435 au § 6 de son Annexe I.

Cette méthode de prévision donne le champ nocturne de l'onde ionosphérique dans la position occupée par un aéronef, pour une valeur donnée de la puissance rayonnée à 500 kHz par une antenne verticale courte. Elle s'applique à des trajets de longueur inférieure ou égale à 4000 km et il convient de l'utiliser avec prudence aux latitudes géomagnétiques supérieures à 60°.

Le plus souvent, le champ de l'onde ionosphérique est polarisé elliptiquement lorsqu'il atteint l'aéronef. Les antennes des aéronefs sont susceptibles de réagir différemment à des champs verticaux et à des champs horizontaux; l'effet combiné de ces champs peut dépendre des dimensions de l'aéronef et de son cap par rapport à la direction d'arrivée de l'onde. En outre, l'onde ionosphérique descendante sera réfléchie par le sol et le champ à l'aéronef dépendra donc aussi du coefficient de réflexion et de l'angle d'arrivée de l'onde descendante. Il faut ajouter que l'emplacement du point de réflexion varie rapidement en fonction du déplacement de l'aéronef. De plus, il peut exister d'importantes différences entre les champs prévus et les données mesurées pour de faibles angles d'arrivée.

En conséquence, la méthode de prévision donne uniquement les composantes maximales du champ (verticale et horizontale) qui seraient mesurées à proximité de l'aéronef, compte tenu des réflexions locales au sol.

On trouvera au § 2 les formules qui donnent le champ de l'onde descendante et, au § 3, les formules qui donnent les valeurs maximales des composantes verticale et horizontale du champ électrique à proximité de l'aéronef.

2. Champ de l'onde ionosphérique descendante

Le plus souvent, l'onde ionosphérique descendante est polarisée elliptiquement. La puissance surfacique de l'onde descendante peut être représentée par un champ équivalent dont l'expression est la suivante:

$$E_D = V + G_S + G_0 - L_{pl} + A_0 - 20 \log p - 10^{-3} k_R p - L_t \qquad (1)$$

dans laquelle:

E_D : valeur médiane annuelle des médianes semi-horaires du champ (dB(μV/m)) pour une force cymomotrice d'émission donnée V, et à une heure donnée t comptée à partir du coucher ou du lever du Soleil suivant le cas, pour l'onde descendante,

V : force cymomotrice de l'émetteur, en dB, par rapport à une force cymomotrice de référence de 300 V (voir § 2.2),

G_S : correction du gain dû à la proximité de la mer, à l'emplacement de l'émetteur (dB) (voir § 2.3),

G_0 : paramètre représenté dans la Fig. 1 en fonction de d (dB),

L_{pl} : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, en dB (voir § 2.4),

$A_0 = 101{,}6 - 2 \sin \Phi$, Φ étant donné par la formule (12),

p : longueur du chemin parcouru par l'onde (en km) (voir § 2.5),

k_R : coefficient d'affaiblissement tenant compte de l'absorption ionosphérique, de la focalisation et des affaiblissements aux extrémités et entre bonds dans le cas des trajets à plusieurs bonds (voir § 2.6),

L_t : coefficient d'affaiblissement horaire (dB) (voir § 2.7).

---

* Ce Rapport est porté à l'attention de la Commission d'études 8.

2.1 *Heure de référence*

On prend pour heure de référence six heures après le coucher du Soleil en un point S de la surface de la Terre. Pour les trajets inférieurs à 2000 km, S est le point milieu du trajet. Pour les trajets plus longs, S est situé à 750 km de l'extrémité où le Soleil se couche en dernier, cette distance étant comptée le long du grand cercle.

2.2 *Force cymomotrice*

La force cymomotrice, V, a pour expression:

$$V = P + 20 \log (d/p) \qquad (2)$$

où:

P: puissance rayonnée (dB(1 kW))

d: distance mesurée sur la surface de la Terre (km)

p: longueur du chemin parcouru par l'onde (km).

Sur les trajets de longueur supérieure à 1000 km, V est très sensiblement égal à P.

Note. – La force cymomotrice de 0 dB (300 V) correspond à une p.a.r.v. de 1 kW.

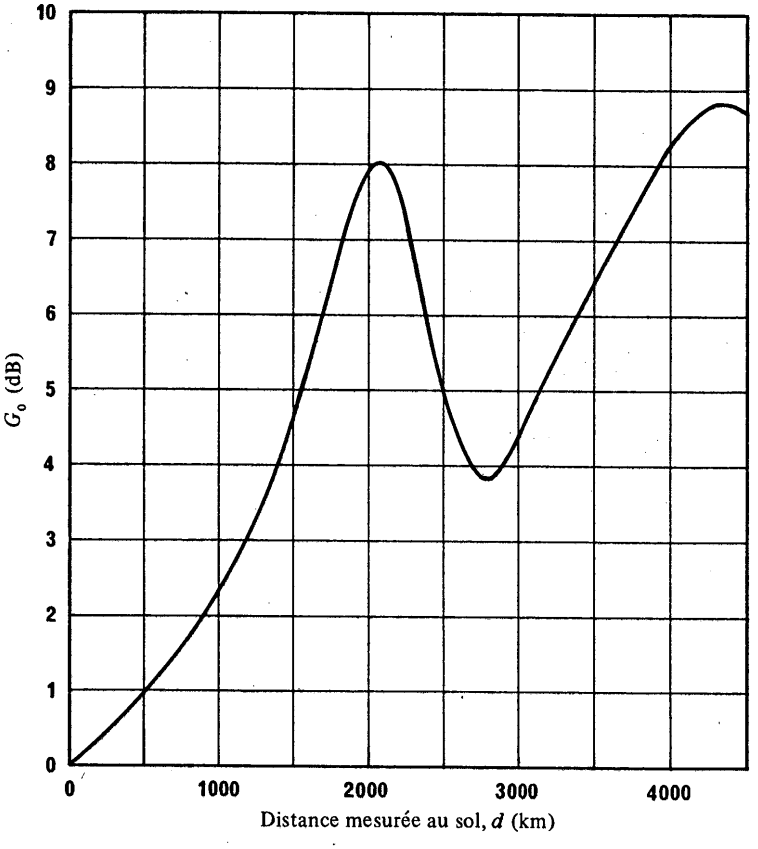


FIGURE 1 – *Gain dû à la proximité de la mer (G_o), pour un émetteur situé sur la côte*

Note. – Cette courbe n'est pas identique à la courbe A de la Fig. 2 de la Recommandation 435, car elle s'applique à la fréquence de 500 kHz.

2.3 *Gain dû à la proximité de la mer*

G_S est le gain supplémentaire qui se manifeste lorsque l'émetteur est situé près de la mer; il ne s'applique pas dans le cas de la propagation au-dessus de l'eau douce. G_S est donné par:

$$G_S = G_0 - c_1 - c_2 \quad \text{si} \quad (c_1 + c_2) < G_0 \qquad (3)$$

$$G_S = 0 \quad \text{si} \quad (c_1 + c_2) \geqslant G_0 \qquad (4)$$

Dans ces formules:

G_0 : gain dans le cas où l'émetteur est situé sur la côte et où la mer n'est pas occultée par un autre segment terrestre,

c_1 : correction destinée à tenir compte de la distance entre l'émetteur et la mer,

c_2 : correction destinée à tenir compte de la largeur d'un ou plusieurs bras de mer ou de la présence d'îles.

G_0 est donné, sur la Fig. 1, en fonction de d.

Le facteur de correction c_1 est donné par:

$$c_1 = \frac{s_1}{r_1} G_0 \tag{5}$$

formule dans laquelle:

s_1 : distance de l'émetteur à la mer, mesurée le long de l'arc de grand cercle (km)

$r_1 = 1{,}4\ G_0^2$ (km)

Le facteur de correction c_2 est donné par:

$$c_2 = \alpha\ G_0 \left(1 - \frac{s_2}{r_2}\right) \quad \text{si} \quad s_2 < r_2 \tag{6}$$

$$c_2 = 0 \qquad \text{si} \quad s_2 \geqslant r_2 \tag{7}$$

où:

s_2 : distance de l'émetteur à la section terrestre suivante, mesurée le long de l'arc de grand cercle, en km,

$r_2 = 1{,}7\ G_0^2$ (km),

α : proportion de terre dans la section du trajet comprise entre r_2 et s_2 ($0 < \alpha \leqslant 1$).

Lorsqu'on effectue ces calculs à l'aide d'un ordinateur et que l'on ne dispose pas d'une banque de données de terrain permettant de calculer le pourcentage α dans la formule (6), on peut poser $\alpha = 1/2$, ce qui revient à supposer une répartition terre/mer de 50% dans la section du trajet comprise entre r_2 et s_2.

Pour faciliter les calculs, on a tracé la Fig. 2 qui représente r_1, distance maximale à la mer pour laquelle il y a lieu de calculer le gain dû à la mer, et également qui représente r_2, distance maximale à la prochaine section de terre pour laquelle il y a lieu d'appliquer la correction c_2.

2.4 *Affaiblissement par couplage de polarisation à l'émetteur, L_{pt}*

L_{pt} est le surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, donné par l'une des deux formules suivantes:

$$L_{pt} = 180\ (36 + \theta^2 + I^2)^{-1/2} - 2 \quad \text{dB} \quad \text{si } I \leqslant 45°$$
$$L_{pt} = 0 \quad \text{si } I > 45° \tag{8}$$

où I est l'inclinaison magnétique nord ou sud en degrés à l'émetteur et θ l'azimut du trajet mesuré en degrés par rapport à la direction magnétique est-ouest, de telle sorte que $|\theta|$ soit inférieur ou égal à 90°. Pour θ et I, il convient d'utiliser les valeurs les plus précises de l'inclinaison et de la déclinaison magnétiques dont on dispose. (Voir par exemple les Fig. 11 et 12 de la Recommandation 435.)

La Fig. 3 représente les valeurs de L_{pt} calculées d'après la formule (8).

2.5 *Longueur du trajet parcouru par l'onde*

Pour les trajets d'une longueur supérieure à 1000 km, p est sensiblement égal à la distance au sol d. Pour les trajets plus courts,

$$p = (d^2 + 40\,000)^{1/2} \tag{9}$$

La formule (9) peut être utilisée avec une erreur négligeable pour n'importe quelle distance. Afin d'éviter toute discontinuité du champ en fonction de la distance, cette formule devra être utilisée dans tous les cas où la gamme des distances concernée comporte des distances inférieures à 1000 km et des distances supérieures à 1000 km.

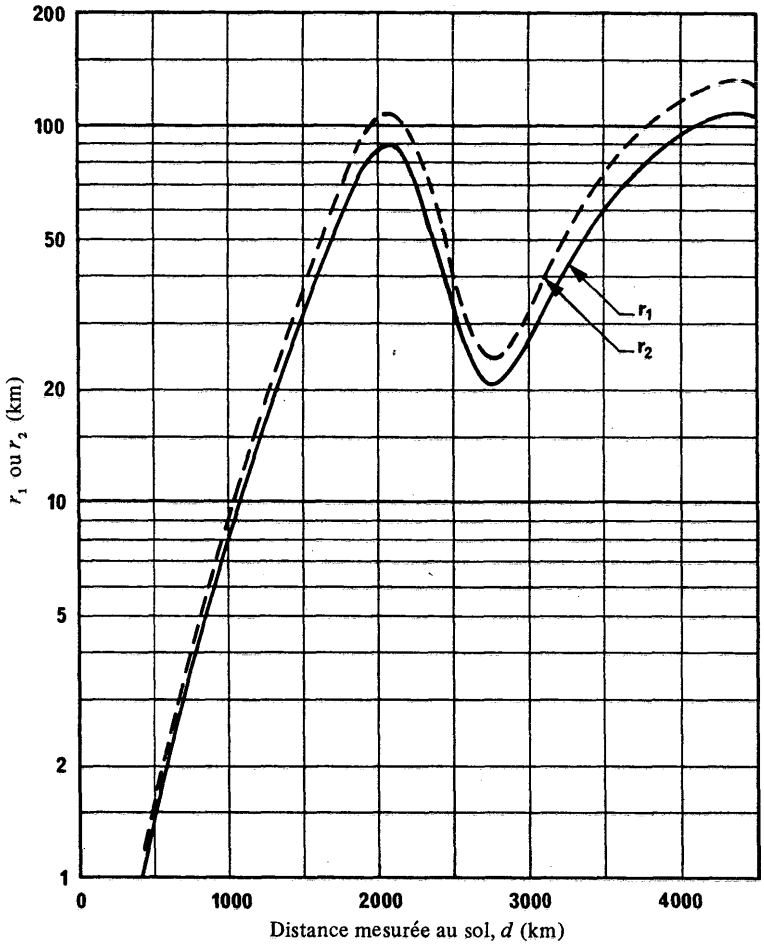


FIGURE 2 – *Valeurs de r_1 et r_2*

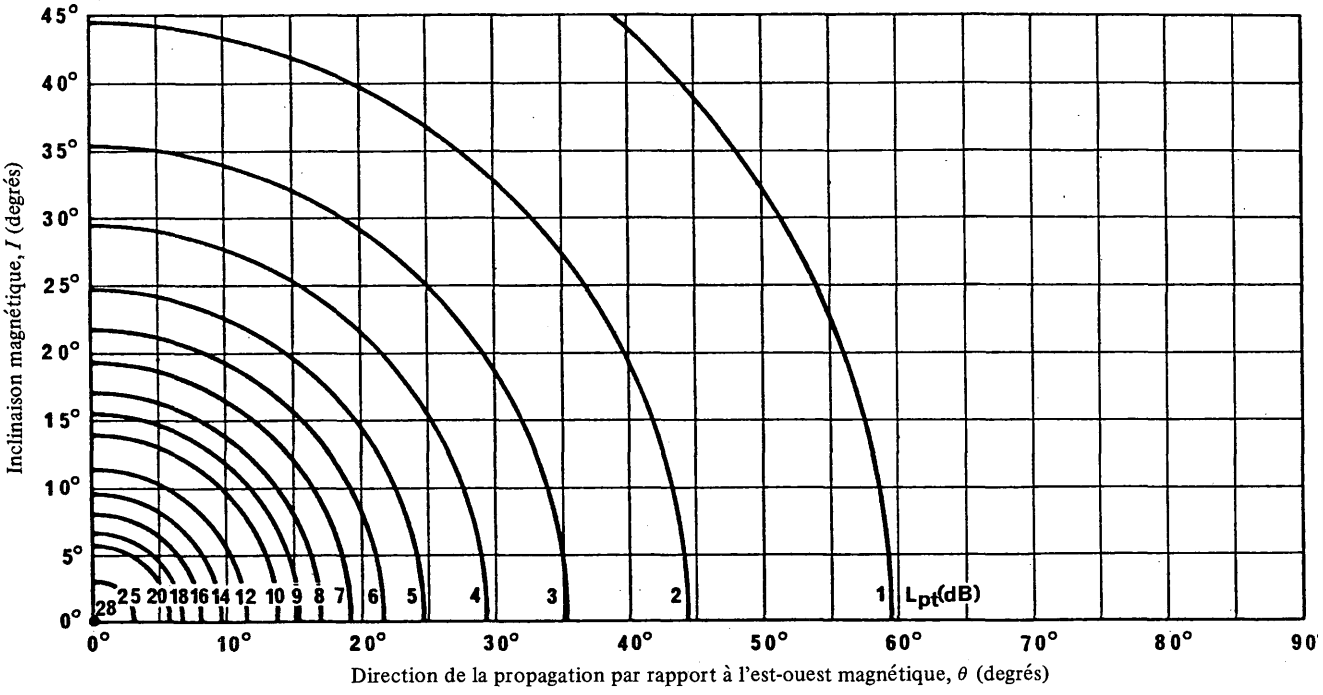


FIGURE 3 – *Surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, L_{pt}*

$$L_{pt} = 180(36 + \theta^2 + I^2)^{-1/2} - 2$$

Note. – On a supprimé la figure inscrite en médaillon dans la Fig. 13 de la Recommandation 435, car elle laisse supposer que la déclinaison magnétique δ est définie par des degrés à l'ouest du nord géographique. On a aussi supprimé la formule qui donne θ, car elle fournit des valeurs négatives pour θ si $(\alpha - \delta)$ dépasse 180°. La définition de θ indiquée sous l'axe horizontal de la figure est jugée suffisamment précise.

2.6 *Coefficient d'affaiblissement*

Le coefficient d'affaiblissement k_R est donné par:

$$k_R = k + 10^{-2}\, bR \tag{10}$$

où:

R : moyenne glissante sur douze mois du nombre relatif international de taches solaires et

$b = 4$ pour les trajets situés en Amérique du Nord,

$b = 1$ pour les trajets situés en Europe et en Australie et

$b = 0$ partout ailleurs.

Le coefficient d'affaiblissement k est donné par:

$$k = 3{,}2 + 2{,}28\ \mathrm{tg}^2(\Phi + 3) \tag{11}$$

Si Φ est supérieur à 60°, on utilise la formule (11) avec $\Phi = 60°$. Si Φ est inférieur à $-60°$, on utilise la formule (11) avec $\Phi = -60°$. La Fig. 15 de la Recommandation 435 (courbe 500 kHz) représente les valeurs de k, calculées à partir de la formule (11), conformément à ces règles.

Pour les trajets d'une longueur inférieure à 3000 km, on prend:

$$\Phi = 0{,}5\ (\Phi_T + \Phi_R) \tag{12}$$

où Φ_T et Φ_R sont respectivement les latitudes géomagnétiques du point d'émission et du point de réception, déterminées en assimilant le champ magnétique terrestre à celui d'un dipôle placé au centre de la Terre et dont le pôle Nord a pour coordonnées géographiques 78,5° N et 69° O. Φ_T et Φ_R sont positifs dans l'hémisphère Nord et négatifs dans l'hémisphère Sud (voir la Fig. 16 de la Recommandation 435). Les trajets d'une longueur dépassant 3000 km sont divisés en deux parties égales que l'on considère séparément. On prend pour valeur de Φ de chaque demi-trajet la moyenne de la latitude géomagnétique d'une extrémité et de celle du point milieu du trajet total, cette dernière étant supposée égale à la moyenne de Φ_T et Φ_R, de sorte que:

$$\Phi = 0{,}25\ (3\Phi_T + \Phi_R) \text{ pour la première moitié du trajet et} \tag{13}$$

$$\Phi = 0{,}25\ (\Phi_T + 3\Phi_R) \text{ pour la seconde moitié} \tag{14}$$

On prend alors la moyenne des valeurs de k calculées à partir de la formule (11) pour chaque demi-trajet et on la porte dans la formule (10).

2.7 *Coefficient d'affaiblissement horaire*

Le coefficient d'affaiblissement horaire L_t est donné à la Fig. 3 de la Recommandation 435, qui représente la moyenne des variations horaires du champ médian annuel pour l'Europe et l'Australie, calculée d'après les Fig. 2 et 6 du Rapport 431; t représente le nombre d'heures après le coucher ou avant le lever du Soleil selon le cas. Ces heures sont prises au point milieu du trajet, au niveau du sol, lorsque d est inférieure à 2000 km et, pour les trajets plus longs, à 750 km de l'extrémité où le Soleil se couche en dernier ou se lève en premier.

La Fig. 17 de la Recommandation 435 donne l'heure du coucher et du lever du Soleil en fonction de l'époque de l'année et de la latitude.

3. Champ à proximité d'un aéronef

L'onde ionosphérique descendante subit la réflexion au sol et le champ résultant à proximité de l'aéronef est la somme vectorielle de l'onde ionosphérique descendante et de l'onde de sol réfléchie. Ce champ sera maximal lorsque les deux ondes sont en phase. On admet que le champ résultant est supérieur de 6 dB à celui de l'onde descendante, parce que l'addition en phase est toujours possible.

Le champ électrique résultant peut être décomposé en une composante horizontale transversale, E_{HT}, et une composante située dans le plan vertical. Cette dernière composante, qui n'est pas elle-même verticale, peut être décomposée à son tour en une composante verticale E_V et une composante horizontale longitudinale, E_{HL}.

Il convient de noter que le champ total peut également contenir une onde de sol: par exemple, pour les aéronefs volant à une altitude d'environ 11 km, l'onde de sol peut être reçue jusqu'à des distances atteignant 400 km. Toutefois, il n'est pas tenu compte de cette onde dans la méthode de prévision.

3.1 *Composante verticale*

La valeur maximale du champ électrique vertical, E_V, dans la position occupée par l'aéronef, est donnée par:

$$E_V = E_D - L_{pv} + 5 + 20 \log (d/p) \tag{15}$$

où:

L_{pv} : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, dans le récepteur, pour une polarisation verticale.

L_{pv} est donné par la formule (8), dans laquelle on remplace L_{pt} par L_{pv}. Il convient d'utiliser les valeurs de θ et de I obtenues pour la position occupée par l'aéronef.

3.2 *Composante horizontale transversale*

La valeur maximale du champ électrique horizontal transversal, E_{HT}, dans la position occupée par l'aéronef, est donnée par:

$$E_{HT} = E_D - L_{ph} + 6 \tag{16}$$

où:

L_{ph} : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, pour une polarisation horizontale.

La Fig. 4 représente les variations de L_{ph}. Aux latitudes des zones tempérées, les valeurs lues sur la Fig. 4 doivent être utilisées avec prudence pour les trajets de longueur inférieure à 500 km.

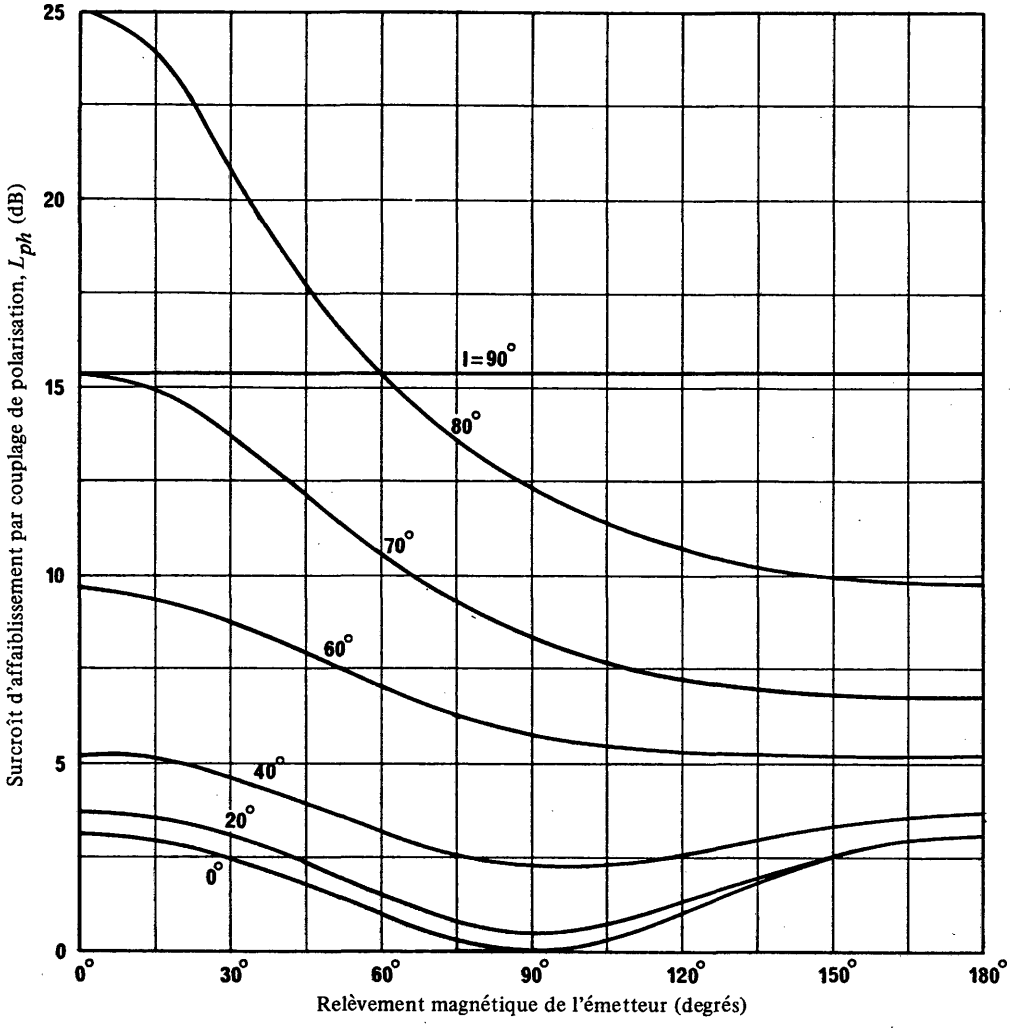


FIGURE 4 – *Surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, L_{ph}, pour une polarisation horizontale*

I: angle d'inclinaison magnétique, nord ou sud (degrés)

Note. – Si l'aéronef se trouve au nord de l'équateur d'inclinaison magnétique, le relèvement magnétique de l'émetteur est mesuré à partir du nord magnétique. Dans le cas contraire, le relèvement est mesuré à partir du sud magnétique.

3.3 *Composante horizontale longitudinale*

La valeur maximale du champ électrique horizontal longitudinal, E_{HL}, dans la position occupée par l'aéronef, est donnée par:

$$E_{HL} = E_D - L_{pv} + 51 - 20 \log p \qquad (17)$$

E_{HL} peut être négligé pour les trajets de longueur supérieure à 1000 km.

4. Variations du champ

Le champ dépassé pendant 10% du temps total d'une série de nuits au cours d'une saison déterminée pendant de courtes périodes centrées sur une heure donnée est supérieur de 8 dB à la valeur de E_D mentionnée au § 2. On peut observer des valeurs plus grandes pendant la période du maximum d'activité solaire.

La nuit, les ondes qui se propagent par l'ionosphère à 500 kHz aux latitudes tempérées ont un champ plus intense au printemps et en automne qu'en été et en hiver, le champ minimal se produisant en été. La variation totale peut atteindre 15 dB. La variation saisonnière est beaucoup plus faible aux latitudes tropicales.

5. Valeur du champ pendant le jour

En Europe, la valeur médiane du champ pendant le jour en hiver est inférieure de 25 dB à la valeur nocturne de E_D donnée au § 2. Pendant le jour, en été, la valeur du champ est inférieure d'environ 60 dB à la valeur de E_D.

Au printemps et en automne en Europe, les valeurs diurnes de champ se situent entre les valeurs de l'été et celles de l'hiver.

RAPPORT 575-3

MÉTHODES DE PRÉVISION DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 150 kHz ET 1705 kHz

(Programmes d'études 31C/6 et 31D/6)

(1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Plusieurs méthodes de prévision du champ de l'onde ionosphérique ont été proposées pour les différentes parties du monde. L'objet de ce Rapport est de décrire celles de ces méthodes qui sont encore utilisées. L'analyse des résultats de mesure correspondants est donnée dans le Rapport 431.

Dans toutes ces méthodes, les champs sont exprimés par leurs logarithmes, en dB(μV/m), de manière à simplifier l'introduction des facteurs de correction.

La forme générale d'une équation de propagation, où le champ est donc exprimé en dB(μV/m), est:

$$E = E_0 + P + \Delta_A - \Delta_t \qquad (1)$$

où

E: valeur médiane annuelle du champ en un lieu et à une heure donnée. Le champ E est celui qui serait mesuré par un cadre placé dans le plan vertical du grand cercle contenant le trajet, à une hauteur inférieure à 0,1 λ. Le champ est ainsi la résultante de l'onde ionosphérique descendante et de l'onde réfléchie par le sol.

E_0: valeur de E dans des conditions normalisées. Par ces conditions, on entend une puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.) de 1 kW ou, ce qui est équivalent, à une force cymomotrice (f.c.m.) de 300 V. E_0 se rapporte aussi à une heure de référence donnée ainsi qu'à certaines conductivités du sol aux extrémités du trajet. L'heure de référence et les conductivités peuvent être différentes selon les méthodes de prévision. Le calcul de E_0 est propre à chaque méthode.

P: correction liée à la puissance réellement fournie à l'antenne.

Δ_A: correction liée au gain de l'antenne d'*émission* dans la direction de propagation considérée. Elle tient compte à la fois des diagrammes horizontal et vertical de rayonnement. Dans le cas d'une antenne d'émission omnidirective verticale, le facteur de correction d'antenne Δ_A est identique au facteur de gain de directivité verticale, G_V, donné par la Fig. 1 de l'Annexe I à la Recommandation 435. Les calculs de P et de Δ_A sont communs à toutes les méthodes.

Δ_t: correction dépendant de l'heure. Le calcul de Δ_t peut varier suivant l'heure de référence adoptée; il peut aussi être remplacé par le calcul d'une correction fonction de la position du Soleil par rapport à un point du trajet considéré.

La valeur normalisée du champ E_0 peut être exprimée d'une façon générale par l'équation:

$$E_0 = C - f(d) + \Sigma\Delta_K \quad (2)$$

où

C : constante, propre à chaque méthode, qui peut cependant varier pour une méthode donnée selon la région du monde.

$f(d)$: influence de la longueur du trajet de propagation.

$\Sigma\Delta_K$: somme de coefficients de correction liés à la fréquence ou à des paramètres spatiaux ou temporels qui dépendent du trajet de propagation et de l'époque considérés.

Les calculs de $f(d)$ et de $\Sigma\Delta_K$ varient d'une méthode à l'autre, mais quelques-uns des éléments peuvent être communs à plusieurs d'entre elles.

Les diverses équations de propagation établies sur ce modèle général permettent de calculer un champ obtenu par propagation ionosphérique et ne tiennent pas compte de l'onde de sol. Dans les cas réels, à courte distance, l'onde de sol est importante et l'on doit prendre des précautions particulières pour tenir compte à la fois de l'onde de sol et de l'onde ionosphérique.

La notion de médiane annuelle du champ demande à être précisée. C'est en principe, et par convention, la médiane annuelle (c'est-à-dire la valeur dépassée pendant 50% des nuits d'une année) des médianes semi-horaires du champ enregistré chaque nuit de l'année pendant une demi-heure centrée sur l'heure considérée; en fait on peut prendre en compte un nombre moindre de nuits, pourvu qu'il demeure suffisamment grand et que ces nuits soient régulièrement réparties au cours de l'année (par exemple une nuit sur deux ou sur trois).

2. Méthode utilisant la courbe nord-sud du Caire

2.1 *Courbe de propagation*

Les premières courbes de propagation utilisées ont été les courbes dites du Caire (voir le Rapport 431), [UIT, 1938], dont l'une se rapportait aux trajets nord-sud et l'autre aux trajets est-ouest. Elles résultent de mesures faites en 1937 et 1938 sur des trajets nord-sud du continent américain, des trajets est-ouest à travers l'Atlantique Nord et des trajets entre l'Europe et l'Amérique du Sud. Les courbes d'origine n'avaient pas été établies sur la base de médianes annuelles de médianes semi-horaires, mais sur des valeurs de «quasi-crête» de champ. La présentation qui est donnée ici, dont les courbes ont des valeurs inférieures de 9 dB aux valeurs originales, est celle qui a été adoptée par la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques et kilométriques (Genève, 1975) pour être utilisée dans la partie asiatique de la Région 3 [UIT, 1975] et est telle que les calculs de prévision faits à partir de ces courbes sont équivalents à ceux de la médiane annuelle de médianes semi-horaires*.

En utilisant la notion de pertes par couplage de polarisation (voir § 2.3) liées à l'orientation du trajet, on peut calculer le champ à partir d'une seule courbe, la courbe nord-sud (Fig. 1) en ajoutant au champ E_c ainsi calculé un terme correctif $-L_p$ dit surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation. On a alors:

$$E_0 = E_c - L_p \quad (3)$$

où

E_0 : valeur médiane annuelle du champ à l'heure de référence;

E_c : valeur du champ déduit de la courbe nord-sud du Caire; elle n'est applicable qu'à des distances supérieures à 300 km;

L_p : surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation.

La courbe de la Fig. 1 peut être exprimée mathématiquement de manière approchée par la formule:

$$E_c = \frac{231}{3 + 0{,}001\ d} - 18 \quad (4)^{**}$$

d étant la distance, en km, comptée le long du grand cercle.

---

* Des mesures faites par l'Inde et le Japon sont décrites dans le Rapport 431.

** A l'occasion d'études sur les méthodes de planification en ondes hectométriques, l'UER a utilisé la formule empirique suivante dite formule de Minne:

$$E_0 = \frac{396}{4 + 0{,}001\ d} - 40$$

La courbe correspondante est située entre les courbes nord-sud et est-ouest du Caire réduites aux valeurs médianes.

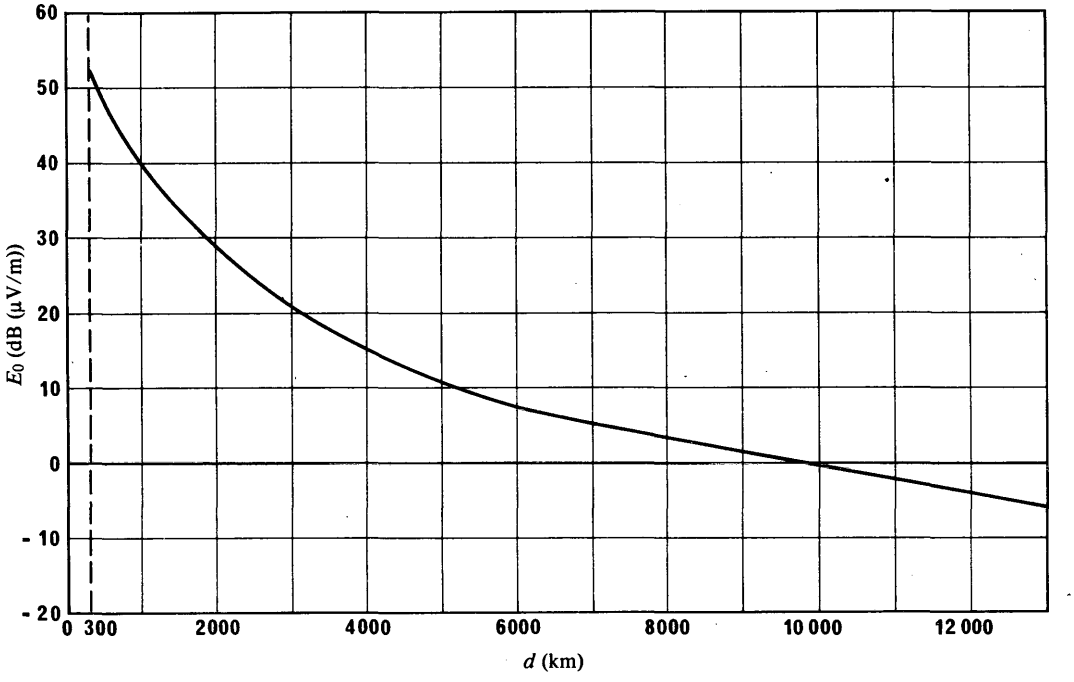


FIGURE 1 – *Champ de l'onde ionosphérique – valeur médiane annuelle tirée de la courbe nord-sud du Caire*

2.2 *Heure de référence*

On prend pour heure de référence minuit local au point milieu du trajet.

2.3 *Surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation, L_p*

Un affaiblissement par couplage de polarisation est dû au fait qu'à l'entrée de l'onde dans l'ionosphère une partie de la puissance de l'onde incidente passe dans l'onde extraordinaire, qui est ensuite absorbée. Un autre affaiblissement se produit lorsque l'onde quitte l'ionosphère parce qu'elle est alors polarisée elliptiquement et que seule sa composante verticale est normalement couplée avec l'antenne de réception.

L'affaiblissement par couplage de polarisation est faible dans les régions tempérées et est représenté par un terme constant dans les formules de propagation. Mais aux latitudes tropicales il est plus grand et dépend de l'orientation de la direction de propagation par rapport au champ magnétique terrestre. Il faut donc tenir compte du surcroît d'affaiblissement par rapport à celui qui est pris en compte aux latitudes tempérées.

Le calcul de ce surcroît d'affaiblissement L_p est décrit au § 2.4 de l'Annexe I à la Recommandation 435.

Le calcul de cette correction à la main est assez fastidieux mais il existe des facteurs de simplification:

- La correction ne doit être calculée qu'entre les latitudes magnétiques 45° N et 45° S. Par suite, aucune correction n'est nécessaire pour les extrémités situées en Europe, en Amérique du Nord, en URSS, dans le sud de l'Afrique, en Australie et en Nouvelle-Zélande.
- On doit estimer l'azimut du trajet sur le grand cercle par rapport au méridien magnétique et non par rapport au méridien géographique; la différence (déclinaison magnétique) est toutefois faible dans la plus grande partie de l'Afrique et de l'Asie où il faut appliquer la correction.

La Fig. 2 est une carte des Régions 1 et 3 établie en projection conique basée sur les parallèles normaux à 28° N et 9° S. La projection est donc approximativement centrée sur l'équateur magnétique dans cette région. Les trajets le long du grand cercle sont approximativement représentés par des droites sur cette carte et si on mesure leur azimut à n'importe quel terminal proche de l'équateur magnétique, l'erreur n'excède pas 2° pour les distances allant jusqu'à 4000 km.

Les erreurs augmentent légèrement quand on s'éloigne de l'équateur mais la valeur calculée pour le surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation décroît simultanément de sorte que l'erreur absolue possible diminue également.

On a représenté sur la Fig. 2 la région où l'erreur sur le surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation peut dépasser 1 dB si on néglige la déclinaison magnétique. Dans le reste de l'Afrique et en Asie continentale, on ne commet qu'une erreur négligeable en mesurant l'azimut par rapport au méridien géographique.

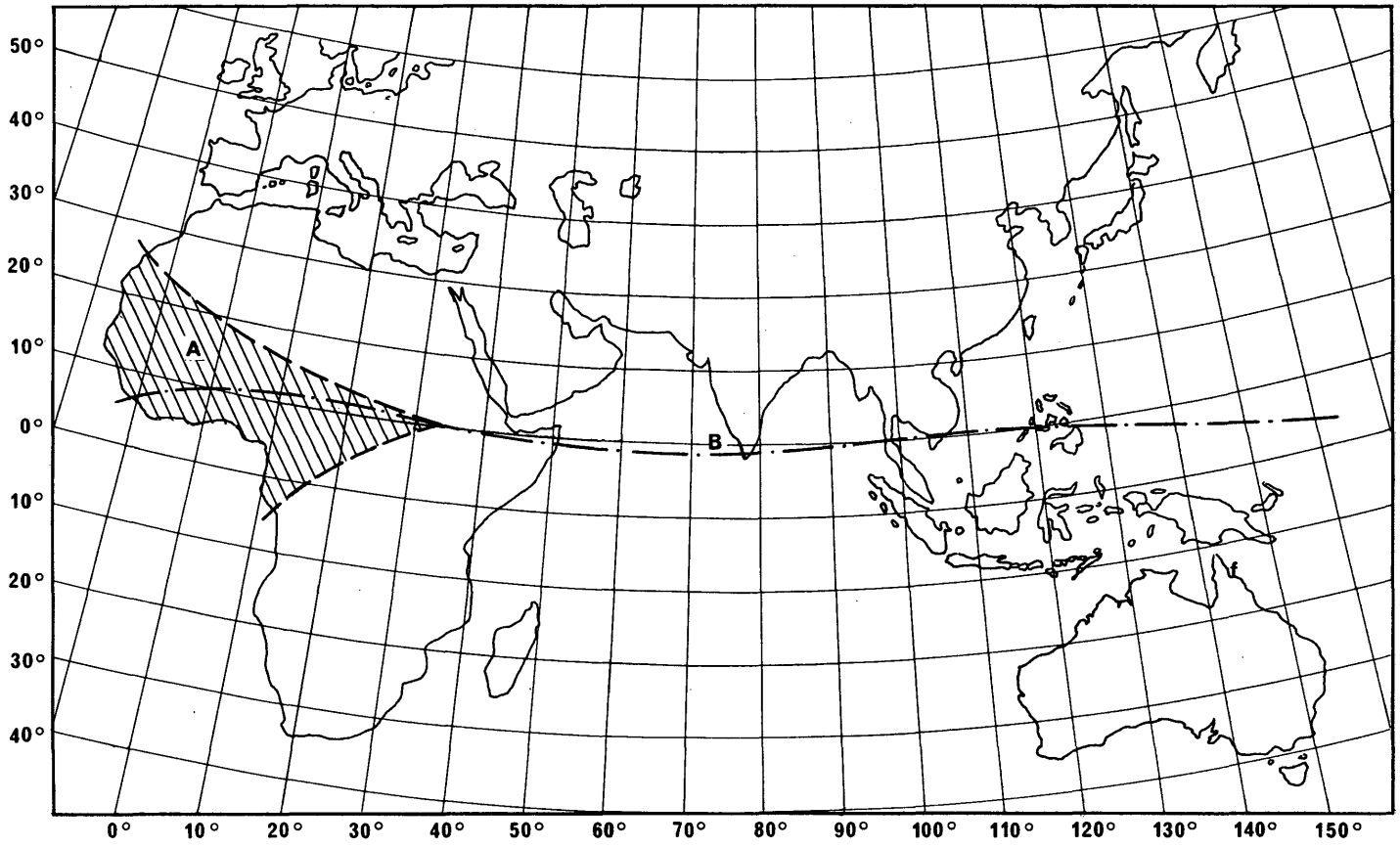


FIGURE 2 – *Carte destinée à faciliter le calcul à la main du surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation (§ 2.3)*

Projection conique
Parallèles normaux 28° N et 9° S
Méridien central 80° E

A: Région où l'erreur sur le calcul du surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation peut dépasser 1 dB si on néglige la déclinaison magnétique
B: Equateur magnétique

2.4 *Affaiblissement horaire, L_t*

Le facteur de correction Δ_t à appliquer quand on utilise la courbe nord-sud du Caire est le facteur L_t décrit au § 2.7 de l'Annexe I à la Recommandation 435.

2.5 *Variations aléatoires du champ d'un jour à l'autre et durant de courtes périodes*

Voir le § 3 de l'Annexe I à la Recommandation 435.

3. Méthode proposée par l'URSS

Les mesures décrites dans le Rapport 431 ont été réalisées en vue d'établir des courbes de propagation ionosphérique utilisables pour la prévision de champ en URSS. L'analyse statistique de ces mesures a permis d'établir une formule empirique qui donne le champ en fonction de la distance et de la fréquence que l'on obtient de la façon suivante [Ivanov-Kholodny et Nikolsky, 1969; Oudaltsov et Chlyuger, 1972; Vilenski et autres, 1970; CCIR, 1970-74]:

$$E_0 = 105{,}3 - 20 \log d - 1{,}9 \times 10^{-3} f^{0{,}15} d - 0{,}24 \times 10^{-3} f^{0{,}4} d(\mathrm{tg}^2\Phi - \mathrm{tg}^2\, 37°) \qquad (5)$$

où

E_0 : est la médiane annuelle du champ en dB(μV/m) pour 1 kW de puissance rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.),

d : la distance à la surface du sol en km,

f : la fréquence en kHz,

Φ : latitude géomagnétique du point du milieu du trajet.

Cette formule est valable pour les valeurs Φ comprises entre 37° et 60°. Elle donne la médiane annuelle du champ à minuit (heure locale) au point milieu du trajet. Pour calculer le champ à d'autres moments de la journée et au cours d'une saison particulière, on doit tenir compte de la Fig. 2 du Rapport 431.

4. Méthode proposée par le Groupe de travail intérimaire 6/4

Le Groupe de travail intérimaire 6/4 a pu montrer que la validité de la méthode de l'URSS peut s'étendre à des distances inférieures à 300 km et à des régions situées au-delà de l'URSS, si on lui apporte les modifications suivantes:

- on remplace la distance à la surface du sol d par la longueur p du trajet parcouru par l'onde;
- on applique, lorsqu'il y a lieu, une correction pour tenir compte du gain dû à la proximité de la mer;
- on applique, dans les régions tropicales, la correction pour le surcroît d'affaiblissement par couplage de polarisation;
- les trajets d'une longueur supérieure à 3000 km sont divisés en deux tronçons égaux, on calcule les facteurs d'affaiblissement séparément pour chaque tronçon et on en prend la moyenne;
- la variation avec la latitude géomagnétique correspond à une fonction asymétrique de Φ, pour tenir compte des différences entre les hémisphères Nord et Sud.

On trouvera dans l'Annexe I à la Recommandation 435 les détails complets de la méthode modifiée. Les modifications n'altèrent pour ainsi dire pas les prévisions du champ faites sur le territoire de l'URSS. Ailleurs, la formule modifiée donne des résultats qui concordent assez bien avec les mesures du champ faites dans la plupart des régions du monde.

Il est souhaitable que l'on fasse de nouvelles mesures dans les régions équatoriales, étant donné que l'exactitude des résultats obtenus avec la méthode de la Recommandation 435 n'a pas encore été suffisamment vérifiée dans ces régions. Il semble que le champ y soit quelque peu différent de celui prévu par la méthode dans laquelle il pourra s'avérer nécessaire d'introduire des facteurs de correction convenables, comme cela a été fait pour l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

Les niveaux des champs mesurés sur des trajets entre l'Amérique du Nord et l'Europe sont de 15 à 20 dB plus élevés que ceux prévus au moyen de la méthode de la Recommandation 435. Il est donc souhaitable que l'on fasse de nouvelles mesures sur des trajets longeant ou traversant la zone aurorale.

5. Méthodes des bonds successifs

Une méthode théorique a été proposée par la BBC [Knight, 1973]. Dans cette méthode, appelée méthode des bonds successifs, la valeur estimée de l'affaiblissement dû aux conditions ionosphériques et terrestres qui affectent l'onde se propageant de l'émetteur jusqu'au récepteur est soustraite du champ qui existerait en l'absence d'affaiblissement. Ce calcul est effectué pour chaque mode de propagation susceptible d'apporter une contribution non négligeable au signal reçu. Ces contributions, évaluées en puissance, sont ensuite ajoutées. Cette méthode est prévue pour toute longueur de trajet et pour une application mondiale à l'exception des régions aurorales. On a calculé les champs pour 152 trajets et on les a comparés aux valeurs mesurées. La différence était inférieure à 10 dB pour 84% des cas lorsque les trajets étaient inférieurs à 3000 km, et pour 66% des cas de trajets plus longs.

La méthode de la propagation par bonds successifs exposée dans le Rapport 265 peut être employée pour des trajets allant jusqu'à 2000 km à des fréquences supérieures à 150 kHz. On peut élargir la gamme des fréquences pour lesquelles cette méthode est utilisable en utilisant des variantes des Fig. 10 et 11 du Rapport 265 qui vont jusqu'à des fréquences équivalentes pour incidence verticale de 1000 kHz [Belrose, 1968]. La méthode peut être employée pour le calcul du champ de l'onde ionosphérique de jour et de nuit.

6. Autre méthode applicable pour les Etats-Unis d'Amérique

Les variations complexes du cycle solaire rendent difficile la prévision du champ. Pour les Etats-Unis d'Amérique, une nouvelle méthode proposée [Wang, 1977] semble plus intéressante. En l'utilisant, on obtient la valeur médiane annuelle du champ en dB, par rapport à 1 microvolt par mètre, pour des trajets terrestres situés au-dessus des Etats-Unis d'Amérique, 2 heures après le coucher du Soleil et au point milieu du trajet; on emploie les expressions suivantes:

$$E = P + G + (102{,}8 - 20 \log p) - L_I - L_R \tag{6}$$

$$L_I = bp \times 10^{-3} \tag{7}$$

$$L_R = [b - 2 + 10 \log (p/1000)]R \times 10^{-2} \tag{8}$$

$$b = (\Phi_M - 40) - 0{,}3(f - 500)/100 \tag{9}$$

où

P: puissance rayonnée, en dB (1 kW),

G: gain de l'antenne d'émission pour un angle de site et un azimut donnés (en dB), pour une antenne verticale courte,

p: longueur du trajet parcouru par l'onde (km) (voir le § 2.5 de l'Annexe I à la Recommandation 435),

L_I: affaiblissement ionosphérique (dB),

L_R: affaiblissement dû à l'activité solaire (dB),

b: coefficient d'absorption,

R: moyenne glissante sur 12 mois du nombre relatif international de taches solaires,

Φ_M: latitude géomagnétique du dipôle au point milieu du trajet (degrés),

f: fréquence (kHz).

Deux heures après le coucher du Soleil constitue une heure de référence généralement reconnue pour les Etats-Unis d'Amérique. Si on choisit 6 heures après le coucher du Soleil, il faut ajouter un facteur de correction d'environ 2,5 dB. La limite supérieure de b est 12; sa limite inférieure doit être telle que ni L_I ni L_R ne peuvent être négatifs.

On trouve dans le Rapport 431 une comparaison des résultats mesurés et des valeurs prévues au moyen des méthodes décrites dans le présent Rapport.

7. Simplifications proposées par le GTI 6/4 pour les travaux de planification dans la Région 2

Lors de ses travaux préparatoires à une Conférence administrative régionale de radiodiffusion (535-1605 kHz, Région 2), le Groupe de travail intérimaire 6/4 a considéré les méthodes de prévision disponibles et les mesures prises dans diverses parties de la Région 2. Pour répondre à ce besoin, certaines simplifications ont été apportées à la méthode décrite dans l'Annexe I à la Recommandation 435.

Pour les travaux de planification, la formule suivante est utilisable dans la Région 2:

$$E = V + G_S - L_p + A - 20 \log p - 10^{-3} k_R p \tag{10}$$

Les seules différences entre la formule (10) et la formule fondamentale (1) de la méthode décrite à l'Annexe I à la Recommandation 435 tiennent aux faits suivants:

- puisque, dans la Région 2, l'heure de référence suit traditionnellement de deux heures le coucher du Soleil, la valeur de la constante A est 103;
- pour les travaux de planification, on peut négliger l'effet de l'activité solaire (c'est-à-dire $k_R = k$);
- le coefficient d'affaiblissement de propagation k est donné par:

$$k = 0{,}067\,|\Phi| + 0{,}2 + 3\,\mathrm{tg}^2\,(\Phi + 3°) \tag{11}$$

Quand $\Phi > 59°$, on utilisera dans la formule (11) $\Phi = 59°$. Quand $\Phi < -59°$, on utilisera dans la formule (11) $\Phi = -59°$. Chaque fois que la formule (11) donnera une valeur de k inférieure à 3, on fixera à 3 la valeur de k. La Fig. 3 montre les valeurs de k calculées d'après la formule (11) en suivant ces règles.

Ces modifications ne sont applicables qu'à la bande 6.

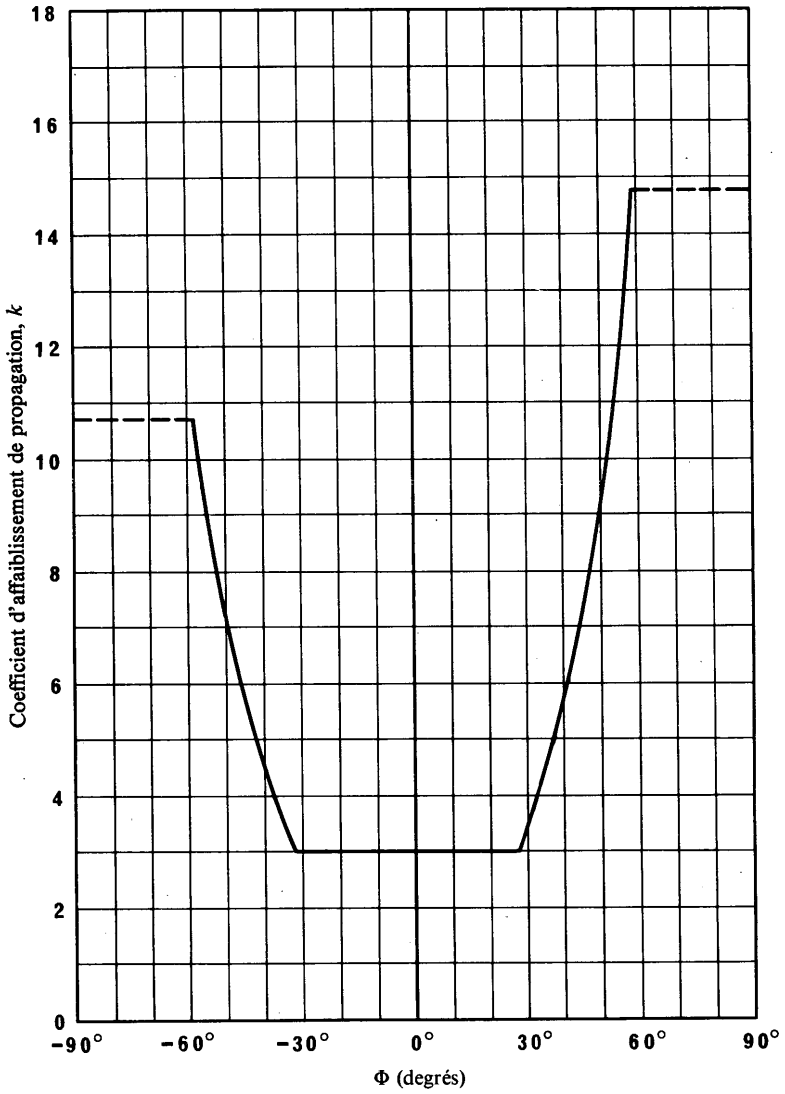


FIGURE 3 – *Coefficient d'affaiblissement de propagation k*

$-59° \leqslant \Phi \leqslant 59°$

$k \geqslant 3$

$k = 0{,}067 \mid \Phi \mid + 0{,}2 + 3\ \mathrm{tg}^2\ (\Phi + 3°)$

8. Considérations sur la bande 1605-1705 kHz

A sa réunion intérimaire d'août-septembre 1983, la Commission d'études 6 du CCIR a décidé (Décision 57) de remettre en activité un Groupe de travail intérimaire (GTI 6/4) pour étudier des problèmes de propagation de l'onde ionosphérique intéressant la Conférence administrative régionale chargée de la préparation d'un plan de radiodiffusion dans la bande 1605-1705 kHz dans la Région 2. Lors de la réunion qu'il a tenue à Lima (Pérou) les 25 et 26 février 1985, le GTI 6/4 a adopté le Rapport 1014 dont les conclusions sont notamment les suivantes:

D'après l'étude la plus récente sur l'influence de la fréquence, la méthode de la Région 2 pour le calcul des champs nocturnes de l'onde ionosphérique dans la bande 535-1605 kHz, telle qu'elle est décrite dans les Actes finals de Rio [UIT, 1982], peut être étendue jusqu'à la fréquence 1705 kHz sans introduire de grandes erreurs supplémentaires. Si les Administrations de la Région 2 préfèrent une méthode un peu plus élaborée pour améliorer l'exactitude des prévisions, elles ont le choix entre deux autres méthodes. Elles pourront envisager la méthode du CCIR simplifiée pour la planification dans la Région 2 (voir le § 7 du présent Rapport) et la méthode de la FCC modifiée [Wang, 1985].

Il y a lieu de signaler que la méthode de la Région 2 (535-1605 kHz) est l'équivalent métrique de la méthode de la FCC, qui ne tient pas compte de l'influence de la latitude géomagnétique. La méthode de la FCC modifiée se ramène à la méthode de la Région 2, avec un terme fonction de la latitude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BELROSE, J. S. [1968] Low and very low frequency radio-wave propagation, AGARD Lecture Series XXIX, NTIS, (Accession N° AD676788, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

IVANOV-KHOLODNY, G. S. et NIKOLSKY, G. M. [1969] *Solntse i ionosfera* (Le Soleil et l'ionosphère). 338-351, Nauka Publishing House, Moscou, URSS.

KNIGHT, P. [1973] MF propagation: a wave-hop method for ionospheric field-strength prediction. *BBC Eng.*, Vol. 100, 22-34.

OUDALTSOV, A. N. et CHLYUGER, I. S. [1972] Propagation curves of the ionospheric wave at night for the broadcasting range. *Geomag. i Aeronom.*, **10**, 894-896.

UIT [1938] Documents de la Conférence Internationale des Radiocommunications du Caire, Tome I, 425-433, Fig. 3, (voir aussi Report of Committee on Radio-Wave Propagation, *Proc. IRE*, Vol. 26, 1193-1234, Fig. 3.

UIT [1975] Actes finals de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques (Régions 1 et 3), Genève, 1975.

UIT [1982] Actes finals de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2), Rio de Janeiro, 1981.

VILENSKI, I. M., OUDALTSOV, A. N. et CHLYUGER, I. S. [1970] Field-strength of radio waves in the 150-1600 kHz range that propagate to great distances from the transmitter. *Geomag. i Aeronom.*, **10**, 204-207.

WANG, J. C. H. [1977] Prediction of medium-frequency sky-wave field strength in North America. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-23, 43-49.

WANG, J. C. H. [mars 1985] A sky-wave propagation study in preparation for the 1605-1705 kHz broadcasting conference. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-31, 10-17.

Documents du CCIR

[1970-74]: 10/82 (URSS).

RAPPORT 431-4

ANALYSE DE RÉSULTATS DE MESURE DE PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE DANS LA BANDE COMPRISE ENTRE 150 ET 1600 kHz

(Programmes d'études 31C/6 et 31D/6)

(1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

Le présent Rapport a pour objet d'exposer les résultats des travaux expérimentaux et des mesures de champ ionosphérique effectuées dans diverses régions géographiques. On trouvera, dans la conclusion, quelques suggestions concernant les travaux futurs.

Ces mesures, ainsi que des études théoriques, ont permis d'élaborer plusieurs méthodes de prévision du champ, applicables à l'échelon régional ou à l'échelon mondial. Ces diverses méthodes sont décrites dans le Rapport 575; le présent Rapport contient des commentaires et des comparaisons entre certaines de ces méthodes et les résultats des mesures.

Tous les résultats de mesure et toutes les prévisions ont été normalisés pour une force cymomotrice de 300 V. Toutes les figures représentent un champ normalisé E_0 en fonction de la distance mesurée à la surface du sol, *d*.

2. Enregistrements du champ pour des distances inférieures à 300 km

On dispose de données expérimentales beaucoup moins nombreuses pour des distances inférieures à 300 km que pour des distances plus grandes, étant donné qu'il est difficile de séparer l'onde ionosphérique de l'onde de sol. Toutefois, on peut diminuer la composante due à l'onde de sol en utilisant une antenne-cadre, orientée transversalement, à l'émission ou à la réception, ou à ces deux emplacements.

On peut aussi séparer l'onde de sol de l'onde ionosphérique par l'émission d'impulsions. On peut identifier les réflexions dans les régions E et F, tout comme les réflexions multiples, d'après leur temps de propagation, et on peut mesurer l'amplitude de chacune d'elles.

2.1 *Mesures en ondes continues*

Müller [1965] a mis au point une méthode d'analyse des enregistrements du champ résultant de l'onde de sol et de l'onde ionosphérique; cette méthode ne peut cependant être utilisée que lorsque l'onde ionosphérique est la composante prédominante.

On a effectué, en Bulgarie, [CCIR, 1963-66a] des mesures sur une distance de 38 km à l'aide d'une antenne-cadre de réception. Les résultats des mesures indiquent que la valeur moyenne des pertes par réflexion est d'environ 12 dB à 827 kHz pendant la période comprise entre deux heures après le coucher du Soleil et 2200 h. Il existe toutefois des variations saisonnières importantes, la réflexion étant plus forte en été.

En avril 1965, on a effectué, en République fédérale d'Allemagne [CCIR, 1966-69a], des enregistrements de champ durant 30 nuits consécutives, entre 0000 et 0620 h UTC. On a utilisé un même émetteur successivement sur 620, 899, 1160 et 1529 kHz; il a fonctionné pendant 50 min sur chaque fréquence et ses émissions ont été simultanément reçues en 3 points alignés, à des distances comprises entre 128 et 274 km. L'antenne d'émission était une antenne verticale courte; partout, les antennes de réception étaient des antennes-cadres.

La Fig. 1 indique les moyennes des valeurs médianes du champ mesuré.

Une analyse de l'ensemble des résultats obtenus, en appliquant la méthode de Müller et en enregistrant le champ total à une distance de 150 à 230 km d'un émetteur de radiodiffusion fonctionnant sur la fréquence 191 kHz et situé en Suède, a montré une bonne concordance avec les valeurs prévisibles de l'affaiblissement dû aux réflexions calculées d'après la méthode décrite dans le Rapport 265.

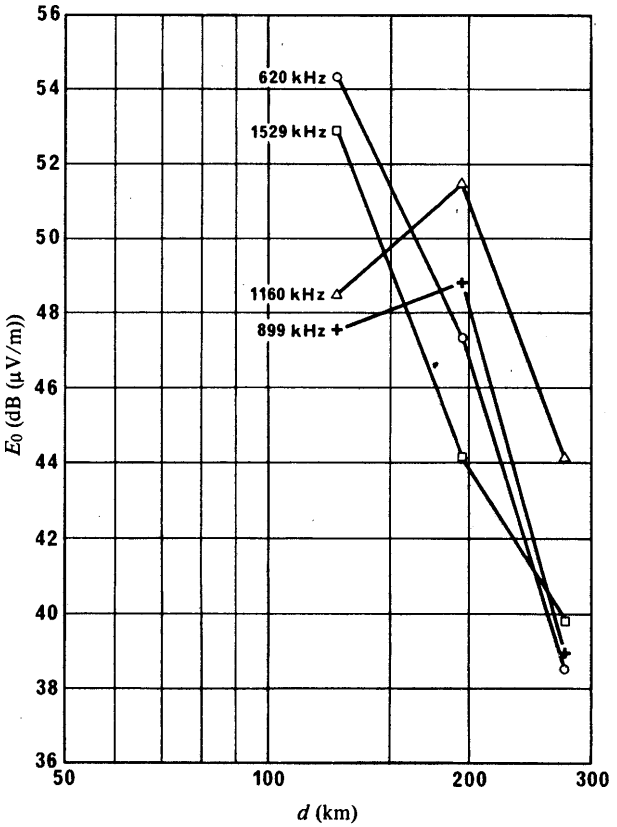


FIGURE 1 – *Champs mesurés en République fédérale d'Allemagne, avril 1965*

On a mesuré au Japon [CCIR, 1982-86a] pendant une à deux années de forte activité solaire entre 2100 et 2400 h (heure locale japonaise) le champ de l'onde ionosphérique reçue sur trois trajets de longueur inférieure à 300 km, à l'aide d'antennes-cadres convenablement orientées pour minimiser la composante due à l'onde de sol. Les évanouissements à court terme correspondent approximativement à la distribution de Rayleigh et les valeurs médianes mesurées concordent assez bien avec les valeurs calculées à l'aide de la méthode du champ complet appliquée au modèle de l'ionosphère internationale de référence avec une couche Es.

2.2 *Mesures par impulsions*

Des mesures par impulsions ont été faites par la République populaire de Pologne, de 1973 à 1975 pendant quelque 170 nuits, à deux fréquences (786 et 1353 kHz) et sur des distances pouvant atteindre 340 km [Rau, 1978]. La plupart des nuits, sauf au printemps, on a observé que l'onde se propageait par l'intermédiaire de la couche E sporadique. Lorsqu'il devrait y avoir réflexion sur la couche F, la présence de la couche Es sur le trajet de l'onde a pour résultat que la médiane du champ mesuré augmente de 8 dB environ. Il semble donc préférable de faire tous les calculs de brouillage en supposant la présence d'une couche réfléchissante à une hauteur de 100 km.

Par suite de l'ionisation de la couche Es, la médiane annuelle du champ, sur des trajets d'au plus 200 km, augmente rapidement pendant la première heure après le coucher du Soleil, puis reste à peu près constante jusqu'à minuit ou même plus tard.

Les résultats de mesures par impulsions sous incidence verticale, effectuées à Tsumeb (Namibie) [Elling, 1961] dans la bande des ondes hectométriques, ont été extrapolés aux cas d'incidence oblique; on en a déduit deux familles de courbes applicables à la réflexion soit dans la région E, soit dans la région F sur des fréquences comprises entre 300 et 1100 kHz. Ces courbes ont été utilisées durant la Conférence africaine de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques [UIT, 1966]. Täumer [1968] a donné une interprétation de la forme des courbes.

3. Mesures du champ entre 300 et 3500 km

3.1 *Europe*

Ebert [1962] décrit une méthode de prévision du champ fondée sur les résultats de mesures effectuées en Europe par l'UER et l'OIRT [CCIR, 1963]. Cette méthode permet de prévoir le champ nocturne, dans la gamme des fréquences comprises entre 150 et 1600 kHz, à des distances de 300 à 3500 km, dans la Zone européenne de radiodiffusion. Les variations horaires et saisonnières qui ont été observées à 845 kHz sont représentées à la Fig. 2. Les mesures à des distances supérieures à 3000 km ont été rares et limitées à des fréquences ne dépassant pas 845 kHz. Les prévisions sont donc d'autant moins fiables qu'elles s'appliquent à des fréquences plus élevées et à des distances plus grandes. La formule de propagation proposée est valable pour un sol de conductivité moyenne (environ 3×10^{-3} S/m) aux deux extrémités du trajet. La correction à apporter pour des cas différents dépendrait de la longueur du trajet. En première approximation, pour des trajets dépassant 1000 km, une bonne conductivité au lieu d'émission (10^{-2} S/m) conduirait à un champ de l'onde ionosphérique supérieur de 1,5 à 2 dB et une faible conductivité (10^{-3} S/m) se traduirait par une diminution du même ordre. Pour un émetteur situé au voisinage de la mer, on peut s'attendre à un accroissement d'environ 6 dB. Le Rapport 401 et le § 2.3 de l'Annexe I à la Recommandation 435 contiennent des renseignements complémentaires sur l'influence de la longueur du trajet et de la distance de la mer sur la valeur de la correction indiquée ci-dessus.

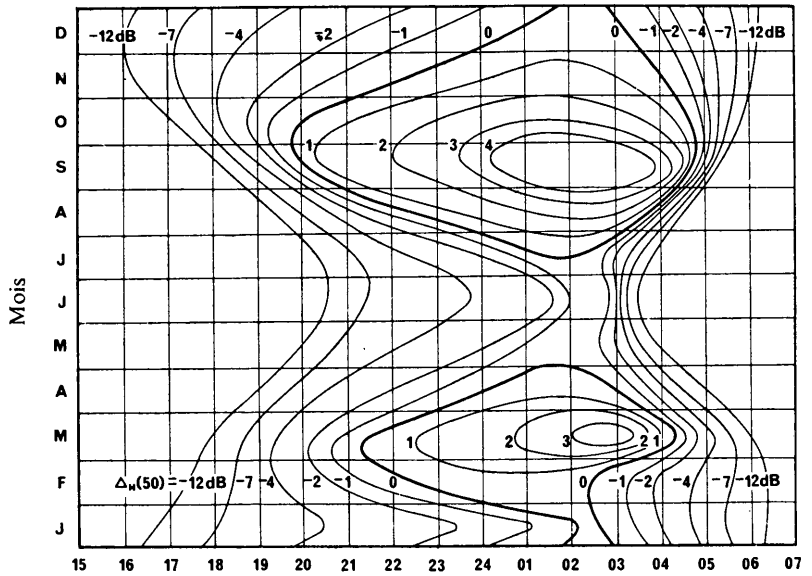


FIGURE 2 – *Correction à appliquer pour tenir compte de l'heure au point milieu du trajet, ainsi que de la saison, déduite des résultats de mesures obtenus dans la Zone européenne de radiodiffusion*
(Fréquence: 845 kHz)

3.2 *Australasie*

Les caractéristiques de la propagation ionosphérique des ondes hectométriques ont été étudiées en Australie [Dixon, 1960; CCIR, 1963-66b]. Les Fig. 3, 4 et 5 donnent des courbes de propagation établies à partir des résultats de deux importantes campagnes de mesures effectuées de 1958 à 1959 et de 1963 à 1965; ces figures donnent les valeurs du champ médian horaire dépassées pendant 50% et 10% des nuits d'une année. Un aspect important de ces résultats est leur variance par rapport aux courbes de propagation, qui est relativement petite.

La Fig. 3 indique le champ, deux heures après le coucher du Soleil, pour des trajets à orientation générale Nord-Sud. La Fig. 4 indique elle aussi les valeurs du champ deux heures après le coucher du Soleil et pendant la période de faible activité solaire, mais elle concerne de longs trajets à orientation générale Est-Ouest. La Fig. 5 donne les valeurs du champ à 23h30 pendant la période de faible activité solaire, pour des trajets d'orientation générale Nord-Sud. Ces courbes ne sont pas applicables aux emplacements de réception donnant sur une étendue de mer, et quand on les applique à des cas particuliers elles conduisent à des erreurs, conformément aux variations indiquées dans le Rapport 432. La Fig. 6 représente les variations horaires et saisonnières observées. L'étude de ces variations [CCIR, 1970-74a] et de celles qui sont applicables à l'Europe fait apparaître des caractéristiques typiques, dont certaines sont communes aux deux hémisphères. Aux latitudes moyennes, le champ maximal sur une année est pratiquement du même niveau dans les deux hémisphères, mais se manifeste à des heures nocturnes différentes.

Une étude détaillée de la propagation de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes hectométriques a été faite en Nouvelle-Zélande pour des émissions empruntant le trajet maritime Est-Ouest entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande, sur des distances de 2000 à 3200 km [CCIR, 1966-69b]. La Fig. 7 récapitule les résultats de 240 heures de mesures effectuées deux heures après le coucher du Soleil. Les valeurs mesurées, pour un trajet de 3200 km, sont supérieures de 6 à 7 dB à d'autres valeurs mesurées en Australie.

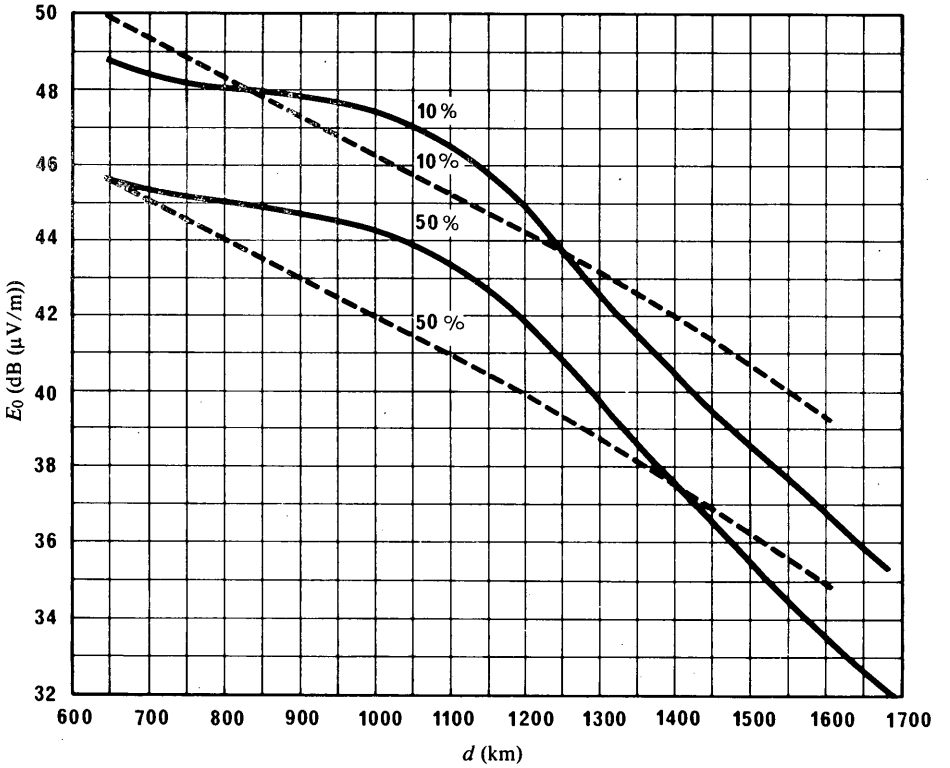


FIGURE 3 – *Résultats de mesures effectuées par l'Australie*
Valeurs médianes horaires du champ dépassé en 50 % des emplacements et pendant 50 % et 10 % des nuits d'une année, à la deuxième heure après le coucher du Soleil

——— : moyenne annuelle du nombre relatif international de taches solaires = 10

– – – – – : moyenne annuelle du nombre relatif international de taches solaires = 180

Trajets nord-sud

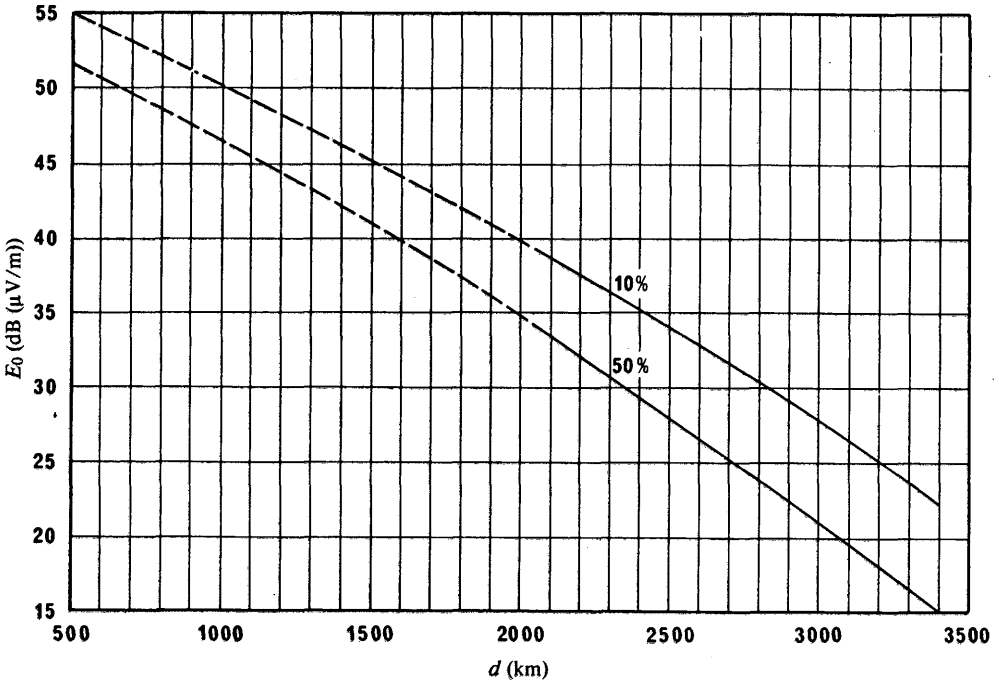


FIGURE 4 – *Résultats de mesures effectuées par l'Australie*
Valeurs médianes horaires du champ dépassé pendant 50 % et 10 % des nuits d'une année, à la deuxième heure après le coucher du Soleil
(Le nombre des trajets étudiés n'était pas suffisant pour permettre d'obtenir une courbe exacte pour la partie indiquée en tiret)

Trajets est-ouest. Moyenne annuelle du nombre relatif international de taches solaires = 20

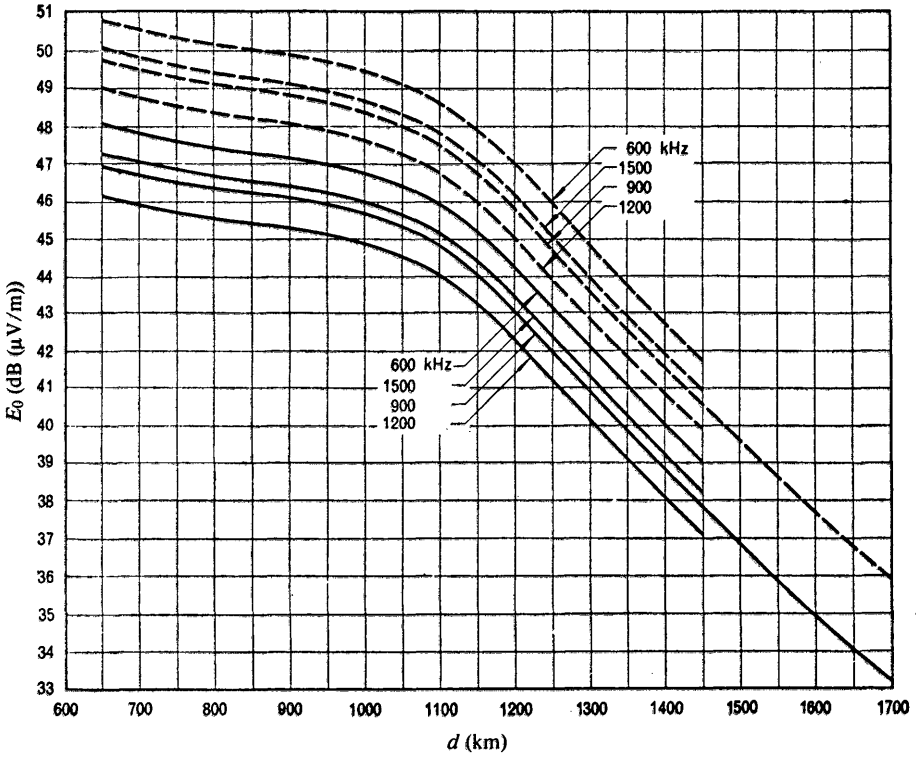


FIGURE 5 – *Résultats de mesures effectuées par l'Australie*
Valeurs médianes horaires du champ dépassé en 50% des emplacements et pendant 50% et 10% des nuits d'une année à 23 h 30

Trajets nord-sud. Moyenne annuelle du nombre relatif international de taches solaires = 10

——— 50 %

– – – – 10 %

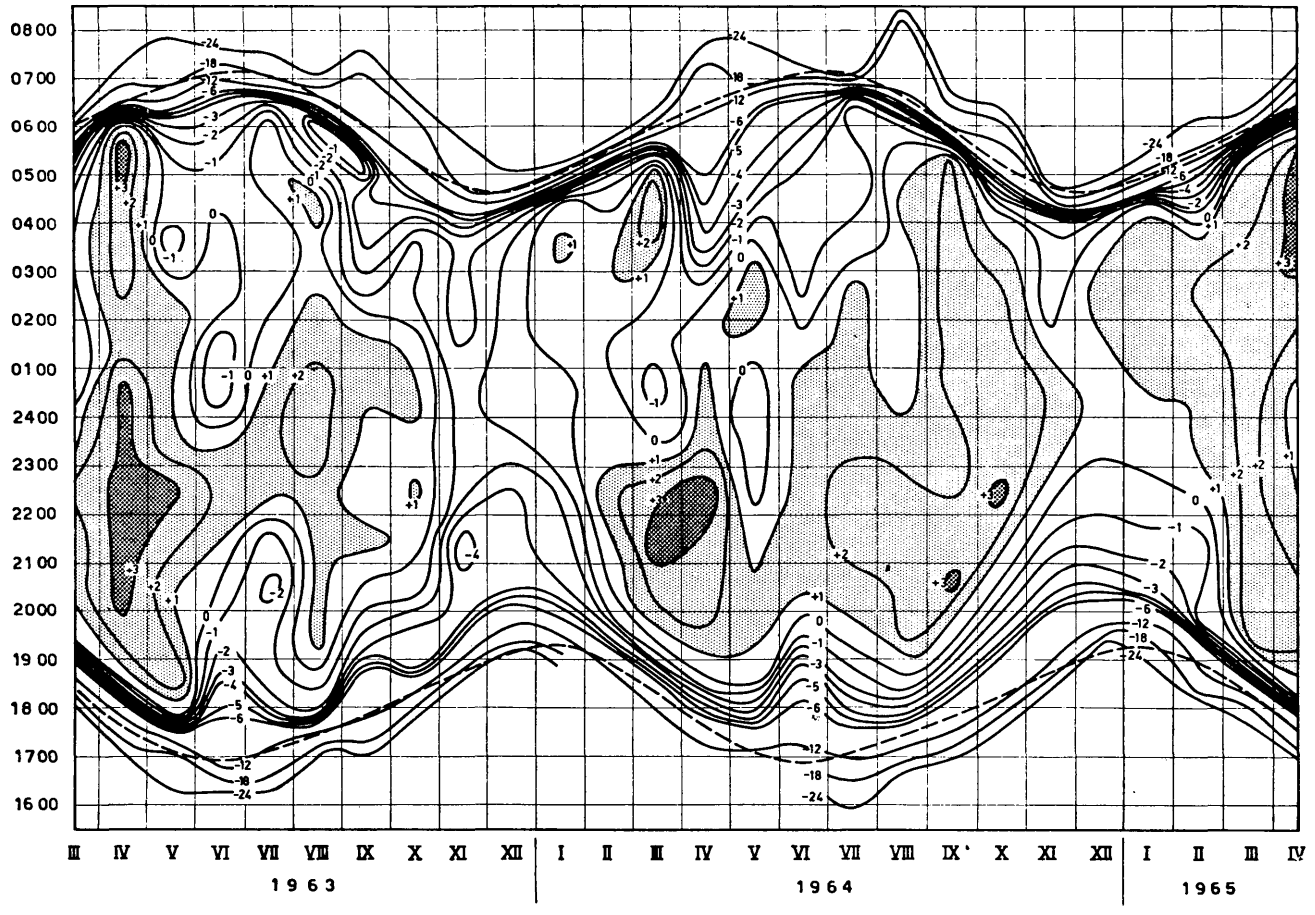


FIGURE 6 – *Variation du champ en fonction de l'heure de la nuit et du mois de l'année déduite des résultats de mesures effectuées par l'Australie*

Les courbes indiquent la valeur médiane horaire du champ dépassé en 50% des emplacements pendant 50% des nuits d'un mois, en dB par rapport à la valeur médiane horaire du champ dépassé en 50% des emplacements pendant 50% des nuits d'une année (avril 1964–mars 1965), deux heures après le coucher du Soleil. Les valeurs données sont exactes pour une transmission quasi longitudinale sur un trajet de 700 km aux fréquences comprises entre 900 et 1100 kHz. Les lignes en tirets indiquent les heures du lever et du coucher du Soleil.

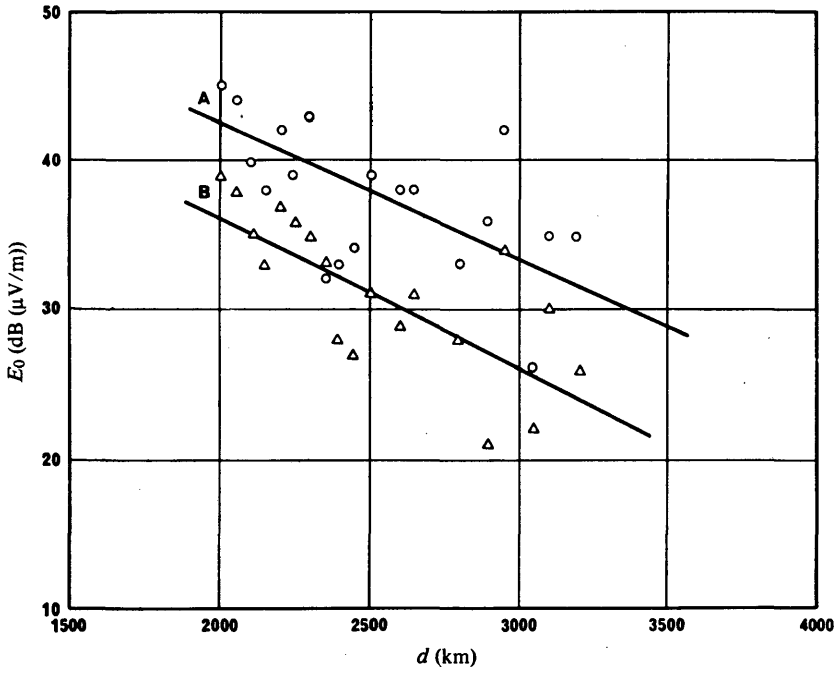


FIGURE 7 – *Champ reçu pendant 50 % et 10 % du temps en 50 % des emplacements*

Trajets maritimes de propagation entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande

Trajets ouest-est: nombre moyen relatif international de taches solaires = 90

○: champs dépassés pendant 10 % du temps (courbe A)

△: champs dépassés pendant 50 % du temps (courbe B)

3.3 *Asie*

Le champ d'émetteurs travaillant aux fréquences comprises entre 550 kHz et 1560 kHz et sur des distances comprises entre 185 et 1760 km a été enregistré en Inde. Le champ dans la direction Nord-Sud est supérieur de 4 à 6 dB aux champs correspondants dans la direction Est-Ouest à cause des fortes pertes par couplage sur les trajets Est-Ouest aux basses latitudes [CCIR, 1970-74b].

De 1974 à 1976, des mesures du champ ont été effectuées en Chine sur 32 trajets dont les distances étaient comprises entre 380 et 8310 km, dans la bande de fréquences 560-1390 kHz. Les latitudes géomagnétiques de ces trajets se situent dans la gamme 16°-36° N (la plupart étant compris entre 20° et 30° N). Une comparaison a été faite entre les résultats de mesures et les résultats prévus en se fondant sur la courbe nord-sud du Caire et les deux méthodes de prévision adoptées par la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques, Genève, 1975. D'après cette comparaison, la courbe nord-sud du Caire donne l'écart type résiduel le plus faible et les écarts résiduels moyens obtenus en appliquant ces trois méthodes sont tous négatifs, c'est-à-dire que les valeurs prévues sont trop faibles. Une analyse de régression des données de mesures portant sur des trajets dans la partie asiatique de la Région 3 démontre que, pour les trajets à latitude géomagnétique faible et moyenne, il n'existe aucune tendance marquée vers une diminution des valeurs de k_R, parallèlement à celle des latitudes géomagnétiques et que les valeurs de A et k_R obtenues en appliquant la méthode décrite dans l'Annexe I à la Recommandation 435 sont légèrement supérieures à celles qui ont été fournies par l'analyse de régression des données de mesures. En ce qui concerne la gamme des latitudes géomagnétiques comprises entre 8° et 29° N, on peut considérer que les valeurs de A et k_R sont constantes, c'est-à-dire que $A = 105$ et $k_R = 3{,}14$ [Pan, 1981; CCIR, 1978-82a].

Des mesures du champ ont été effectuées en Inde pendant environ une dizaine d'années sur 3 circuits fonctionnant en ondes hectométriques sur des distances de 2840 km, 3155 km et 4380 km. L'analyse montre qu'il existe une corrélation négative significative entre le champ nocturne en ondes hectométriques et l'activité solaire. Une analyse de régression des mesures donne, pour les circuits dans cette région, une valeur moyenne de b de 0,74 dans l'équation du coefficient d'affaiblissement k_R figurant dans l'Annexe I à la Recommandation 435 [CCIR, 1982-86b].

3.4 *Amérique*

Un grand nombre de mesures ont été effectuées aux Etats-Unis d'Amérique pendant un cycle solaire complet [Damelin, 1971]. La FCC [1972] a utilisé ces données pour tracer des courbes des valeurs médianes annuelles du champ. Barghausen [1966] a fait une comparaison entre ces courbes et celles obtenues selon la méthode de prévision applicable à l'Europe [Ebert, 1962]. Wang [1977] a comparé toutes les mesures à diverses méthodes de prévision, y compris celle qui est proposée dans l'Annexe I à la Recommandation 435. Cette dernière comparaison montre que, aux Etats-Unis d'Amérique, les champs mesurés sur des trajets nord-sud sont supérieurs aux champs prévus selon la méthode indiquée dans l'Annexe I, d'une valeur pouvant atteindre 15 dB. En revanche, pour des trajets est-ouest, les valeurs mesurées sont de 10 dB inférieures aux valeurs prévues. En période de faible activité solaire, la méthode de l'Annexe I fait apparaître une meilleure concordance avec les mesures que les méthodes de prévision de la FCC ou de l'UER. En période de forte activité solaire, aucune des méthodes n'est entièrement satisfaisante. De plus, les mesures indiquent que contrairement au terme de fréquence indiqué dans l'Annexe I à la Recommandation 435 les champs augmentent avec la fréquence.

Une méthode de prévision de l'onde ionosphérique pour les trajets de l'Amérique du Nord, mise au point par Wang [1977], donne le champ en fonction de la fréquence, de la latitude géomagnétique ainsi que de l'activité solaire et de la longueur du trajet. Comparées aux mesures faites par la FCC, cette méthode, les courbes de la FCC, et la méthode proposée par le GTI 6/4 présentent respectivement un écart quadratique moyen, par rapport aux données observées de 4,8 dB, 12,9 dB et 7,1 dB.

Crombie [1979] a montré qu'aux Etats-Unis, en période de forte activité solaire, l'affaiblissement de transmission en ondes hectométriques dépend de façon significative de la direction de la propagation. Pour des longueurs de trajet comprises entre 300 et 2800 km, cet affaiblissement est plus marqué que prévu dans le sens est-ouest; il est aussi plus marqué que dans le sens ouest-est. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les trajets nord-sud et sud-nord. Les résultats de mesures à court terme effectuées dans diverses parties d'Amérique, dont les Caraïbes [Wang, 1979] et le Mexique [Fernandez et Wang, 1980] ont été comparés aux previsions obtenues par application de la courbe nord-sud du Caire, des courbes de la FCC, et de la méthode de la Recommandation 435. Pour les trajets de latitude élevée (6 trajets, latitude géomagnétique du point milieu comprise entre 53° et 63,5° N, de longueur comprise entre 630 et 1500 km), les champs mesurés étaient notablement inférieurs aux prévisions. Pour les trajets de faible latitude (7 trajets, latitude géomagnétique du point milieu comprise entre 31° et 36° N, longueur comprise entre 630 et 2200 km), les champs mesurés étaient largement supérieurs aux prévisions. Pour les faibles latitudes, la courbe nord-sud du Caire et celle de la FCC semblent donner de meilleurs résultats que la méthode de la Recommandation 435. Toutefois, en période de faible activité solaire, les champs mesurés concordent bien avec les prévisions tirées de la méthode décrite dans le Rapport 575. Les mesures effectuées au Mexique indiquent que la valeur du décile supérieur n'est que d'environ 6 dB supérieure à la valeur médiane, au lieu des 8 à 12 dB observés aux Etats-Unis.

Au cours de trois périodes (juillet-août 1979, mars-avril 1983 et juillet-août 1983), des mesures du champ nocturne de l'onde ionosphérique ont été effectuées pendant environ 463 h au Brésil sur huit circuits portant sur des distances comprises entre 352 et 1675 km et des fréquences comprises entre 600 et 1510 kHz [Assis Brasil, 1979; CCIR, 1982-86c]. La latitude géomagnétique du point médian de ces circuits est comprise entre 2,1° N et 12,6° S. Les résultats de ces mesures ont été comparés [CCIR, 1982-86c] avec les résultats des méthodes de prévision suivantes:

a) Annexe I à la Recommandation 435,

b) courbe de canaux par temps clair de la FCC,

c) autre méthode proposée par Wang [1977] pour les Etats-Unis et

d) méthode FCC modifiée [CCIR, 1982-86d].

Les résultats sont indiqués au Tableau I. On peut conclure que toutes les méthodes théoriques examinées sous-estiment les valeurs de champ effectives.

Les circuits d'environ 380 km ayant fait l'objet des mesures pendant la période juillet-août 1979 (latitude géomagnétique de point médian comprise entre 11° S et 12,6° S) ont fait apparaître une absorption ionosphérique inversement proportionnelle à la fréquence (valeur caractéristique 11 dB entre 1410 et 620 kHz). En outre, l'analyse des résultats de ces mesures indique que l'affaiblissement de propagation dans la direction ouest-est est supérieur d'environ 3,6 dB à l'affaiblissement dans la direction nord-sud.

TABLEAU I – *Erreur moyenne et écart type des mesures effectuées par le Brésil (valeur prévue – valeur mesurée)*

Méthode	Erreur moyenne (dB)	Ecart type (dB)
(a)	−6,5	9,9
(b)	−8,4	1,1
(c)	−0,7	7,0
(d)	−1,0	7,3

3.5 *Afrique*

Une campagne de mesures, qui a duré environ une année en tout, de juin 1963 à juillet 1964, a été organisée en Afrique, [CCIR, 1963-66c], mais beaucoup de trajets n'ont été étudiés que pendant moins d'un an. Les résultats ainsi obtenus correspondent aux prévisions faites pour l'Europe mais offrent une dispersion relativement grande, qu'on n'a pas pu expliquer.

4. Champs mesurés à des distances supérieures à 3500 km

De nombreuses mesures sur des distances comprises entre 1500 et 12 000 km ont été faites de 1935 à 1937 à des fréquences voisines de 1 MHz. On a utilisé ces mesures pour établir les courbes dites du Caire [UIT, 1938; Knight, 1977a]. A l'origine, celles-ci donnaient le champ quasi maximum; pour permettre des comparaisons avec d'autres courbes et d'autres méthodes de prévision, toutes les valeurs ont été réduites de 9 dB pour donner les valeurs médianes de champ. Il y a deux courbes du Caire: la courbe Est-Ouest est tirée de mesures faites à travers l'Atlantique Nord; il se peut que ces mesures aient été affectées, dans une certaine mesure, par l'absorption aurorale. La courbe Nord-Sud est tirée de mesures faites surtout entre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud; l'une des extrémités (Buenos-Aires) était située près de la mer. Ces courbes sont représentées sur la Fig. 8.

Des mesures portant sur des trajets de longueur comprise entre 3200 et 9300 km et sur des fréquences comprises entre 620 et 1345 kHz ont été effectuées par l'UER [CCIR, 1966-69c et 1970-74c]. La République fédérale d'Allemagne a effectué des mesures à Tsumeb (Namibie) sur trois trajets Nord-Sud, sur des distances d'environ 7000 km, aux fréquences de 164 kHz (Allouis), 845 kHz (Rome) et 1602 kHz (Ismaning) [Eyfrig et autres, 1975]. La Fig. 8 illustre une comparaison entre les résultats de ces mesures et ceux de mesures effectuées avant 1938 (on a réduit ces derniers de 9 dB pour convertir des valeurs quasi maximales en valeurs médianes).

Les résultats obtenus indiquent que les champs observés à des distances supérieures à 3500 km – surtout sur les trajets Nord-Sud – sont très supérieurs à ceux que laisse prévoir l'extrapolation des courbes pour la Zone européenne. Il semble que la courbe du Caire pour les trajets Nord-Sud (voir la Fig. 8) permette de prévoir les valeurs de champ les plus élevées observables lorsque les antennes d'émission et de réception sont situées sur un terrain de conductivité moyenne.

Des méthodes de mesure et d'analyse du champ ont été élaborées en URSS [Gadden, 1964; Vilenski et autres, 1970; Oudaltsov, 1971; Oudaltsov et Shlyuger, 1972; CCIR, 1970-74d]. Des mesures ont été faites sur 14 fréquences voisines de 200, 500, 1000 et 1500 kHz, sous différentes latitudes, à des distances comprises entre 600 et 4500 km. Les résultats font l'objet de la Fig. 9 [CCIR, 1966-69d].

Aux latitudes moyennes, les courbes de l'URSS font ressortir une dépendance beaucoup plus faible du champ par rapport à la fréquence que les courbes de l'Europe. Aux latitudes élevées, l'absorption ionosphérique croît rapidement avec la fréquence et il en découle une plus grande dépendance du champ par rapport à la fréquence qu'aux basses latitudes.

Une série de mesures de propagation à longue distance de l'onde ionosphérique en bande 6 (ondes hectométriques) a été entreprise par l'Union asiatique de radiodiffusion. La Fig. 10 montre les valeurs maximales, médianes et minimales pour chacun des 25 trajets étudiés. Les valeurs ont été dérivées de distributions horaires ou semi-horaires cumulées [CCIR, 1970-74e]. On constate que toutes les courbes de champ médian à long terme sont très voisines de la courbe N-S du Caire [UIT, 1938] lorsque les valeurs de celle-ci sont convenablement retranscrites des valeurs quasi maximales aux valeurs médianes.

Des mesures ont été effectuées au Japon depuis 1961 sur 57 fréquences comprises entre 548 et 1550 kHz. Les résultats, pour des fréquences voisines de 500 kHz, sont représentés graphiquement sur la Fig. 11 [CCIR, 1970-74e].

Les deux graphiques supérieurs de la Fig. 12a représentent les résultats de deux campagnes de mesure de champ en ondes hectométriques sur des trajets de propagation ouest-est/est-ouest et nord-sud, qui ont été menées en juin et juillet 1973 dans la partie nord de l'océan Pacifique à bord de navires japonais. La campagne s'est poursuivie jusqu'en novembre 1973 dans la partie sud de l'océan Pacifique. Les résultats de ces dernières mesures, qui ont été effectuées principalement pendant les mois d'équinoxe dans l'hémisphère sud, sont représentés sur le graphique inférieur de la Fig. 12b. Tous les résultats de cette figure, indépendamment de la direction de propagation et de la fréquence, suivent assez bien la courbe N-S du Caire, bien que le champ mesuré dans l'hémisphère sud soit supérieur de 10 dB environ [Nemoto et autres, 1976]. Des mesures similaires, dont les résultats sont aussi voisins de la courbe N-S du Caire, ont été faites en juin 1974 dans les parties nord et sud de l'océan Atlantique à bord d'un navire de la République fédérale d'Allemagne [Schwentek et Geisweid, 1975].

Certaines mesures décrites dans ce chapitre ont été effectuées sur des trajets entre une région de l'UIT et une autre. On a effectué une comparaison détaillée entre les champs prévus et mesurés pour les trajets interregionaux ayant une extremité dans la Région 2 [CCIR, 1978-82b]. Une comparaison de méthodes disponibles pour la prévision de l'onde ionosphérique en bande hectométrique a aussi été effectuée aux Etats-Unis d'Amérique [Pokempner, 1980].

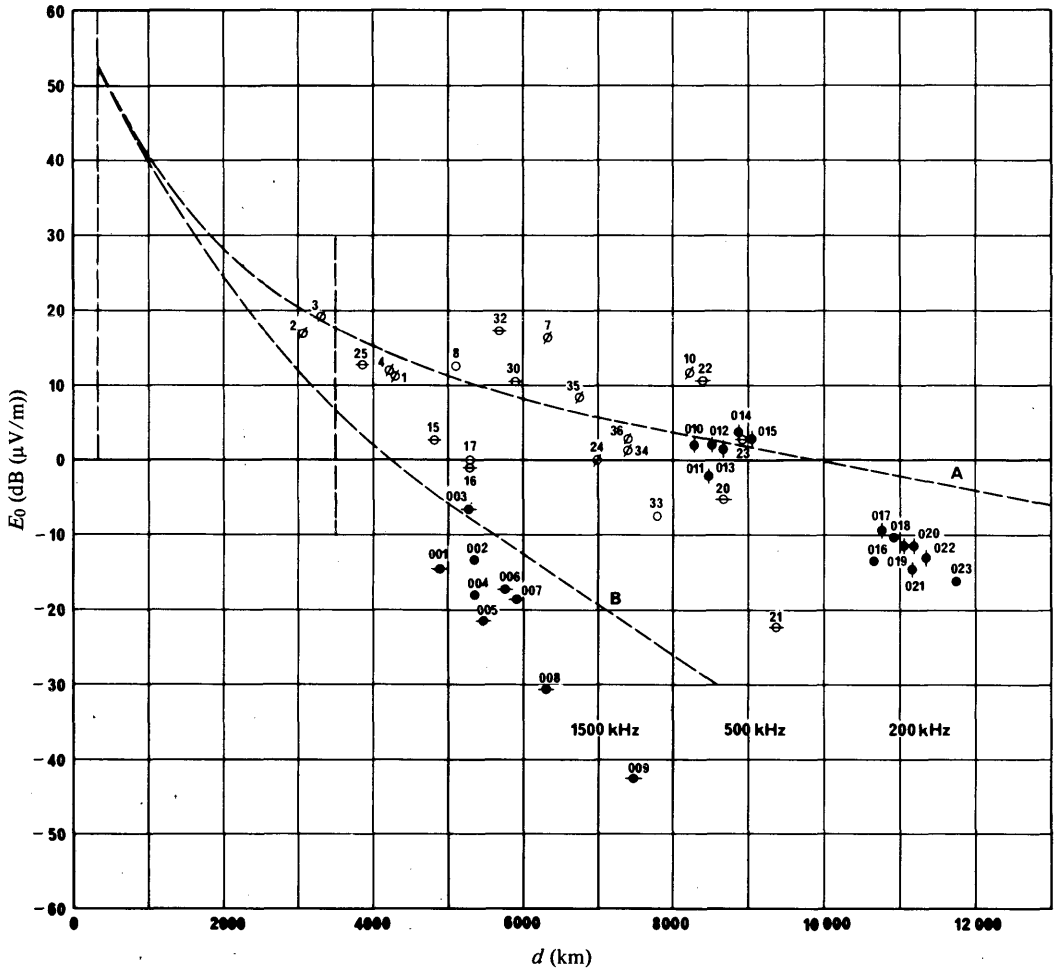


FIGURE 8 – *Champ de l'onde ionosphérique mesuré à des distances supérieures à 3000 km*

A: N-S Le Caire 1938
B: E-O Le Caire

ø N/S ⊕E/O	UER
1 Riyad-Helsinki	21 Swan Island-Helsinki
2 Batra-Wittsmoor	22 Swan Island-Jurbise
3 Batra-Helsinki	23 Swan Island-Monza
4 Dakar-Limours	24 Fort de France-Jurbise
7 Batra-St Denis	25 Kuwait-Monza
8 Harrar-Monza	30 Masirah-Limours
10 Rome-St Denis	32 Masirah-Leucate
15 Sackville-Limours	33 Bangkok-Helsinki
16 Sackville-Châtonnaye	34 Ismaning-Tsumeb
17 Moncton-Châtonnaye	35 Rome-Tsumeb
20 Poro-Helsinki	36 Allouis-Tsumeb

♦N/S ⊕E/O UIR	Nov. 1936-Jan. 1937
001 Northern Ireland-Ottawa	013 Pittsburgh-Buenos Aires
002 Rennes-Ottawa	014 Buenos Aires-Strathburn (CAN)
003 New York-London	015 Buenos Aires-Ottawa
004 Northern Ireland-Washington	016 Toulouse-Buenos Aires
005 Rennes-New York	017 Rennes-Buenos Aires
006 New York-Bruxelles/Eindhoven	018 Nice-Buenos Aires
007 Rennes-Washington	019 Buenos Aires-London
008 New York-Berlin	020 Paris-Buenos Aires
009 New York-Moscow	021 Northern Ireland-Buenos Aires
010 Buenos Aires-Washington	022 Buenos Aires-Bruxelles
011 Buenos Aires-New York	023 Buenos Aires-Berlin
012 New York-Buenos Aires	

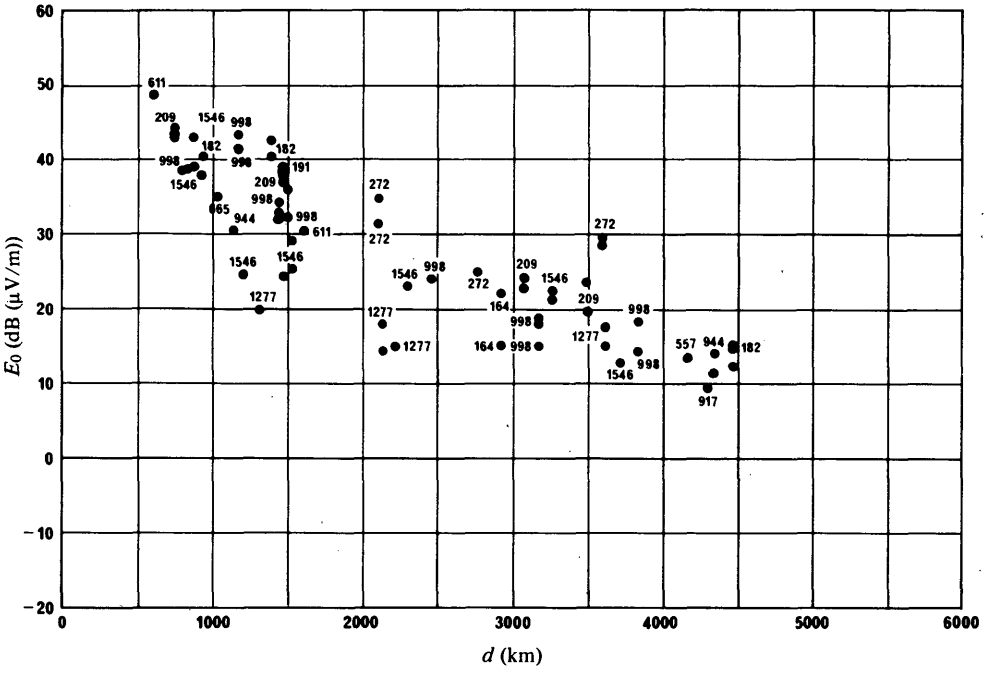


FIGURE 9 – *Résultats de mesures effectuées en URSS*
(Fréquences en kHz indiquées à côté de chaque point)

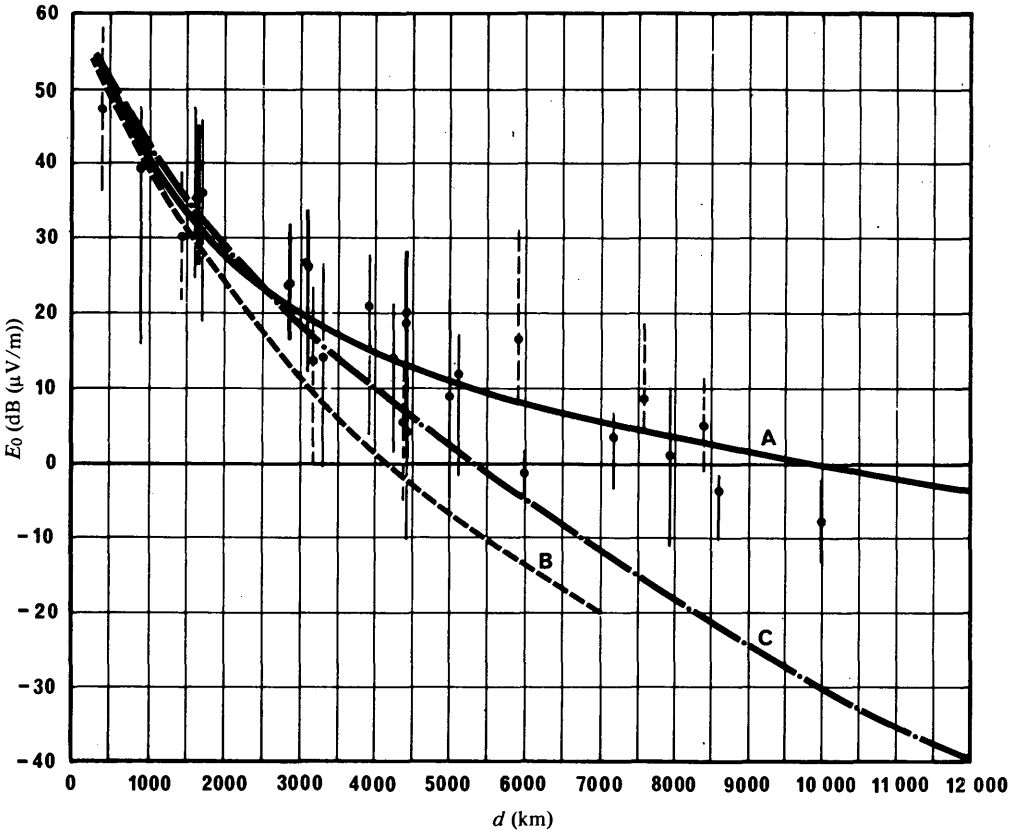
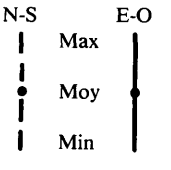


FIGURE 10 – *Mesures effectuées en Asie*



A: courbes N-S, Le Caire, 1938
B: courbes E-O, Le Caire, 1938
C: courbe pour 1 MHz établie d'après la formule (5) du Rapport 575 pour une latitude géomagnétique de 37°

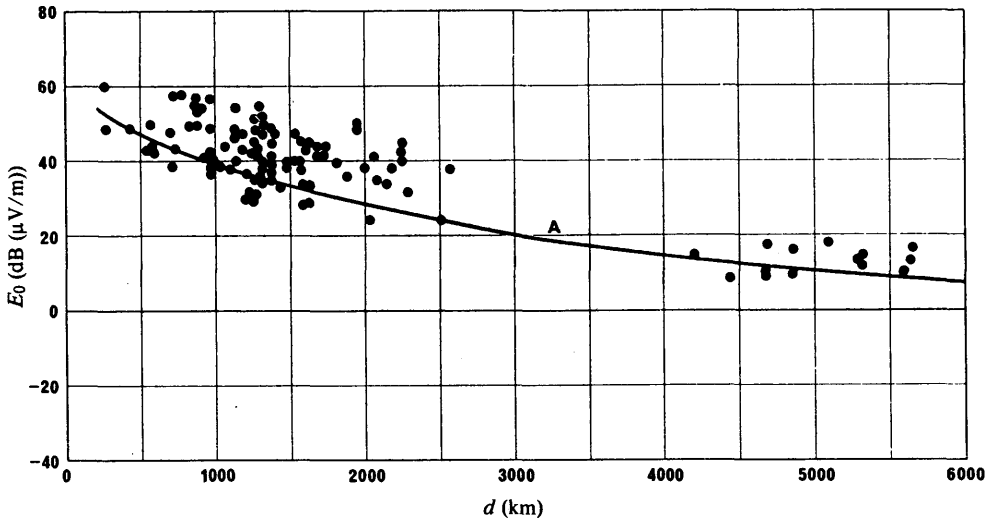


FIGURE 11 – *Mesures faites au Japon*

Médianes annuelles horaires ou semi-horaires mesurées à des fréquences voisines de 500 kHz sur des trajets est-ouest

A: courbe N-S, Le Caire

5. Propagation diurne de l'onde ionosphérique

5.1 *Ondes kilométriques (bande 5)*

Une étude faite au Royaume-Uni [Bell et Knight, 1978] a montré que le champ ionosphérique dans la gamme des ondes kilométriques se propageant en hiver sur des trajets situés en Europe, pendant les heures de jour, est plus faible de 10 à 15 dB seulement que sa valeur correspondante pendant les heures de nuit. Ce fait a été confirmé par des mesures effectuées au Royaume-Uni aux fréquences 227 kHz et 251 kHz, respectivement sur des distances de 1380 km et 1650 km [Knight, 1983]. On observe aussi des ondes ionosphériques diurnes au printemps et en automne; au moment de l'équinoxe de printemps, leur champ est presque aussi fort qu'en hiver. Ces ondes ionosphériques diurnes sont observées à de faibles niveaux en Europe pendant l'été. En Inde, toutefois, la différence entre les champs diurnes en été et en hiver est inférieure à 6 dB [Sain et autres, 1968].

Les conclusions données ci-dessus s'appliquent à la période d'activité solaire minimale. On ignore comment elles sont modifiées par l'activité solaire; aussi convient-il de procéder à de nouvelles mesures lors de la prochaine période d'activité solaire maximale.

5.2 *Ondes hectométriques (bande 6)*

Les mesures effectuées en Allemagne à des fréquences de 1160 kHz et 1538 kHz, respectivement à des distances de 610 et 405 km, ont montré que la valeur moyenne annuelle du champ ionosphérique à midi est inférieure d'environ 45 dB à la valeur correspondante pour minuit [CCIR, 1963-66d].

Täumer et Starick [1969] ont analysé des variations saisonnières des valeurs médianes du champ diurne entre 1963 et 1965. Les résultats de cette analyse montrent que, pendant les heures de jour, le champ décroît, de l'hiver à l'été, d'environ 18 dB à 845 kHz et de 31 dB à 1466 kHz. La différence entre les champs médians diurnes et nocturnes varie, à 845 kHz, d'environ 42 dB en hiver à 54 dB en été; à 1466 kHz, cette différence est comprise entre 40 dB en hiver et 65 dB en été.

Le champ diurne à 750 kHz a été enregistré au Japon depuis 1969 sur un trajet de 740 km. Les variations saisonnières à midi suivent celles de l'angle zénithal du Soleil. La différence entre les médianes annuelles du champ à midi et à minuit durant la période de faible activité solaire est de 42 dB. La correction à appliquer à la moyenne annuelle de référence valable pour $R_{12} = 0$ est d'environ $-0{,}055\ R_{12}$ dB, R_{12} étant la moyenne glissante sur douze mois du nombre de taches solaires [CCIR, 1970-74f].

On a étudié les résultats de mesures effectuées aux Etats-Unis sur huit trajets de propagation pendant tout un cycle d'activité solaire. Les analyses annuelles des données recueillies aux Etats-Unis concordent en général parfaitement avec celles qui ont été faites en Allemagne et au Japon. Cependant, si l'on se borne à examiner les résultats relatifs à la saison d'hiver, certains désaccords apparaissent. Aux Etats-Unis, la différence entre les valeurs médianes du champ de nuit (soit 6 heures après le coucher du Soleil) et celles du champ de jour (à midi) est, en hiver, généralement comprise entre 25 et 30 dB. Dans les zones de latitude élevée, où l'anomalie d'hiver est particulièrement prononcée, la différence peut être notablement plus faible [Wang, 1983].

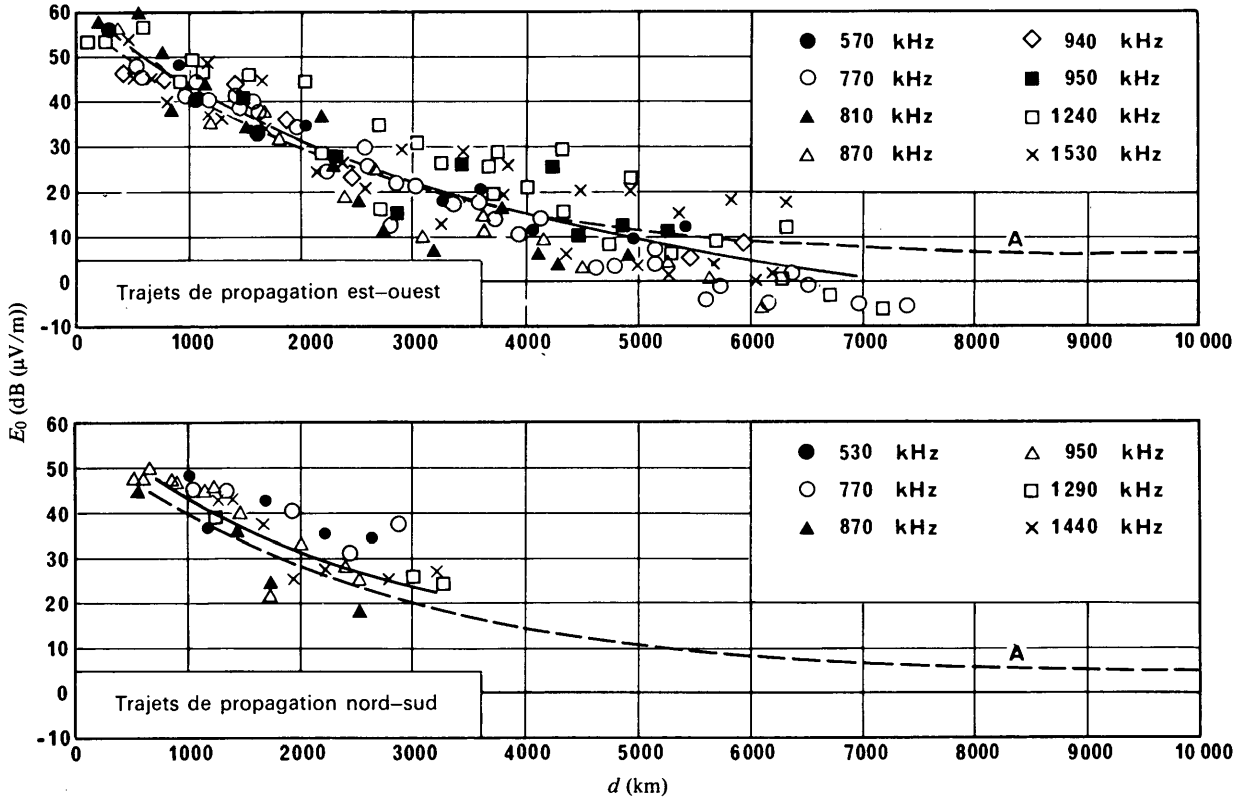


FIGURE 12a – *Variation du champ nocturne dans la bande 6 (ondes hectométriques) en fonction de la distance, mesurée dans le Pacifique nord (été)*

A: courbe Le Caire N-S

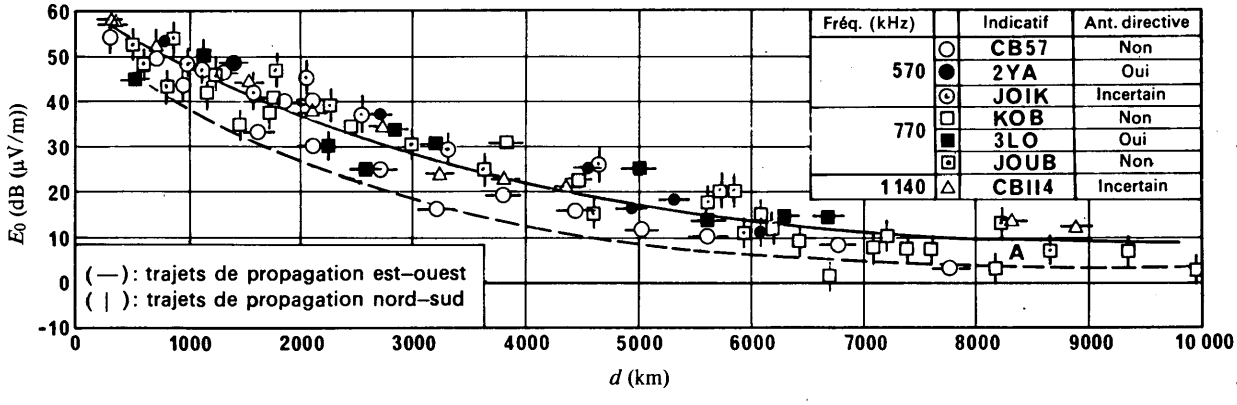


FIGURE 12b – *Variation du champ nocturne dans la bande 6 (ondes hectométriques) en fonction de la distance, mesurée dans le Pacifique sud (équinoxe)*

A: courbe Le Caire N-S

6. Variations du champ

Knight [1977b] a fait une étude détaillée des variations du champ ionosphérique en ondes kilométriques et hectométriques. L'étude était fondée sur toutes les sources d'information publiées, complétées par une analyse des données mesurées.

6.1 *Fréquence des évanouissements*

Le champ de l'onde ionosphérique varie continuellement. La fréquence des évanouissements, définie comme le nombre de fois en un temps donné où le champ augmente jusqu'à dépasser la valeur médiane, est proportionnelle à la fréquence et dépend aussi de l'angle d'incidence par rapport à l'ionosphère. Sur de longs trajets, les réflexions sur la région E prédominent et la fréquence des évanouissements, à 1 MHz, est d'environ 10 par heure en Europe; on a mesuré au Japon des fréquences d'évanouissements environ trois fois supérieures. Ces évanouissements relativement lents font place à des évanouissements plus rapides lorsque des réflexions se produisent sur la région F ou lorsque deux modes de propagation de niveau comparable sont reçus simultanément.

6.2 *Distribution de l'amplitude*

Aux fréquences élevées de la bande des ondes hectométriques, le champ observé au cours de deux ou trois cycles d'évanouissements obéit en général à la distribution de Rayleigh (voir le Rapport 266). En ondes kilométriques, la différence entre la valeur quasi maximale et la valeur médiane est quelque peu inférieure (normalement 3 dB la nuit et 1,7 dB le jour) et la distribution se rapproche davantage de la distribution log-normale.

Les champs médians mesurés à un moment donné varient de manière aléatoire d'une nuit à l'autre, selon une distribution log-normale. La dispersion des valeurs mesurées pendant un nombre de jours suffisamment court pour exclure les effets saisonniers et solaires, ne laissent apparaître aucune dépendance évidente par rapport à la fréquence ou à la longueur du trajet. Sur la plupart des trajets, la différence entre les champs dépassés pendant 10% et 50% des nuits est comprise entre 3,5 et 8,8 dB; une différence de 5,5 dB peut être considérée comme courante. Dans la gamme des ondes kilométriques, les ondes ionosphériques se propageant pendant les heures de jour en hiver varient quotidiennement de manière analogue.

Les variations enregistrées pendant de courtes périodes et les variations quotidiennes contribuent toutes deux à la variation globale du signal reçu. Il est raisonnable d'admettre que le champ dépassé pendant 10% du temps total, pour une série de nuits, pendant de courtes périodes centrées sur une heure spécifique, est supérieur de 6,5 dB dans le cas des ondes kilométriques et de 8 dB dans celui des ondes hectométriques aux champs médians dérivés des courbes ou des formules de propagation. Au cours des périodes analogues, pour une série de jours, le champ dépassé en ondes kilométriques pendant 10% du temps total est de 5 dB supérieur aux champs médians pour l'heure de jour de référence.

6.3 *Variations diurnes*

Pour toute fréquence donnée, le taux d'accroissement du champ au coucher du Soleil et le taux de diminution au lever du Soleil sont quasi indépendants de la longueur du trajet, bien que l'on observe, de prime abord, une tendance minime de la propagation nocturne à se produire de plus en plus tard au fur et à mesure que s'accroît la longueur du trajet. La propagation nocturne a aussi tendance, au début, à être plus tardive aux fréquences inférieures de la bande des ondes hectométriques. Aux latitudes tempérées, le passage des conditions diurnes aux conditions nocturnes commence en hiver, au moins une heure avant le coucher du Soleil, mais en été, la transition commence à une heure plus proche de celle du coucher du Soleil et elle est plus rapide. La courbe des variations diurnes moyennes donnée dans la Fig. 3 de l'Annexe I à la Recommandation 435 est compatible avec les mesures effectuées.

Selon les résultats de mesures faites aux Etats-Unis, le champ de l'onde ionosphérique dépend énormément de la fréquence pendant les heures de transition [Wang, 1983]. Par exemple, le champ d'une émission sur 1530 kHz est supérieur d'environ 15 dB à celui d'une émission sur 700 kHz au lever ou au coucher du Soleil. On a, en conséquence, tracé une famille de courbes de variation diurne pour différentes fréquences. Lorsqu'on la compare aux données des Etats-Unis, on constate que la Fig. 3 (coefficient d'affaiblissement horaire) de l'Annexe I à la Recommandation 435 est tout à fait satisfaisante pour les fréquences voisines de 1000 kHz. Des résultats analogues sont également cités par Knight [1977b].

Dans la bande des ondes kilométriques, le passage des conditions diurnes aux conditions nocturnes est très progressif en Europe, où il faut attendre jusqu'à environ deux heures avant le lever du Soleil pour que le champ atteigne son maximum. La diminution rapide au moment du lever du Soleil est suivie en hiver d'une augmentation progressive jusqu'à un maximum au milieu de la journée, qui peut être inférieur de 10 dB seulement au champ maximal nocturne. En été, le champ augmente beaucoup plus rapidement au moment du coucher du Soleil et la variation diurne ressemble à celle observée en ondes hectométriques.

6.4 *Variations avec la saison*

La nuit, le champ ionosphérique des ondes hectométriques se propageant aux latitudes tempérées est à son maximum au printemps et en automne et à son minimum en été et en hiver, le minimum d'été étant le plus prononcé. Les variations globales peuvent atteindre 15 dB aux fréquences les plus basses de la bande des ondes hectométriques pour décroître jusqu'à 3 dB à l'extrémité supérieure de la bande. Aux ondes kilométriques, les variations saisonnières nocturnes présentent la tendance inverse, avec un maximum très marqué en été. Les variations saisonnières sont beaucoup plus réduites aux latitudes tropicales.

On observe des variations saisonnières importantes pendant les heures de jour en Europe, où le champ ionosphérique des ondes kilométriques se propageant en hiver est supérieur d'au moins 20 dB à celui qu'on observe en été et il peut être inférieur de 10 dB seulement à sa valeur nocturne. Dans la gamme des ondes hectométriques, les variations saisonnières en Europe dépassent 30 dB mais le champ diurne en hiver est inférieur d'au moins 10 dB à celui qu'on enregistre aux ondes kilométriques.

Des valeurs de champ ionosphérique des ondes hectométriques mesurées de nuit aux Etats-Unis montrent qu'il n'y a pratiquement aucune variation saisonnière cohérente sauf un léger minimum pendant l'été. Les champs diurnes présentent toutefois un fort maximum pendant l'hiver, semblable à celui qu'on observe en Europe.

6.5 *Variations avec l'activité solaire et magnétique*

L'activité solaire entraîne une diminution du champ ionosphérique des ondes hectométriques pendant la nuit, diminution qui dépend de la longueur du trajet, et de l'emplacement géographique. Cette diminution est 3 ou 4 fois plus grande en Amérique du Nord qu'en Europe, mais aux latitudes tropicales, on estime qu'elle est négligeable. Des travaux de Wang [1977] amènent à penser que cette diminution est fonction de la latitude géomagnétique, de la fréquence, de la distance et du nombre de taches solaires. L'activité solaire n'a que peu ou pas d'influence sur la propagation nocturne des ondes kilométriques mais il n'est pas certain que cela soit vrai pour la propagation diurne des ondes kilométriques. Il a été signalé [Wang, 1983] que, dans la bande des ondes hectométriques, le champ de jour de l'onde ionosphérique varie en fonction de l'activité solaire d'une façon analogue au champ de nuit.

La plus grande variation qui est observée sur les trajets nord-américains, particulièrement pour les trajets ayant le point milieu ou les points de réflexion à des latitudes géomagnétiques supérieures à 40°, est probablement due à leur latitude géomagnétique plus élevée, et à une plus grande absorption supplémentaire associée aux orages magnétiques et aux effets post-orageux.

Des mesures effectuées en Amérique du Nord montrent que le facteur qui contribue le plus à la reduction du champ ionosphérique nocturne en bande hectométrique est l'absorption liée à l'activité magnétique [Barghausen et Lillie, 1965; Hagg, 1982]. Un facteur supplémentaire qui contribue sporadiquement à la réduction du champ, d'octobre à février, est l'absorption liée à l'anomalie d'hiver. Ces facteurs peuvent causer des variations considérables du champ médian.

Les valeurs annuelles de la médiane (50%) et du décile supérieur (10%) du champ sont plus étroitement liées à l'activité magnétique qu'au nombre annuel moyen des taches solaires R. En raison de cette interdépendance de l'activité solaire et magnétique, et comme la corrélation entre le champ en bande hectométrique et chacun de ces facteurs n'est pas encore établie, il n'est pas encore possible pour ces trajets à latitude élevée de l'Amérique du Nord de prédire avec précision la variation du champ pendant le cycle solaire.

Les effets des orages magnétiques dépendent de la fréquence [Wang, 1983]. L'absorption liée aux orages, en particulier pendant les premiers jours qui suivent le début d'un orage, augmente avec la fréquence.

7. Travaux futurs

7.1 Des données sur la propagation devraient être recueillies dans les parties du monde pour lesquelles on ne dispose pas encore de données sûres.

7.2 Il est nécessaire d'améliorer par des études la précision des prévisions, en tenant compte de paramètres tels que la conductivité du sol, ce qui n'a pas été fait convenablement jusqu'ici.

7.3 L'étude de la propagation de l'onde ionosphérique, sur de courtes distances (inférieures à 300 km) et sur de très grandes distances (supérieures à 3500 km) devrait être poursuivie. Jusqu'à présent, les courbes proposées résultaient principalement, non de mesures directes du champ de l'onde ionosphérique, mais de déductions théoriques. Etant donné que jusqu'à maintenant, on n'a pas suffisamment étudié la fréquence critique de la couche E la nuit, il est risqué d'extrapoler les données obtenues sous incidence verticale au cas des incidences obliques, et donc au calcul de l'onde ionosphérique à courte distance. Il est donc nécessaire de poursuivre les études de la fréquence critique de la couche E la nuit et du coefficient de réflexion par les couches E et F des ondes hectométriques et kilométriques sous différentes incidences. On devra, si possible, faire des mesures directes de l'onde ionosphérique à courte distance.

Quant aux mesures à grandes distances, elles devraient contribuer à déterminer notamment l'influence de l'activité solaire et s'il existe des différences sensibles entre les trajets au-dessus des océans et ceux au-dessus des continents.

7.4 Le besoin se fait sentir de procéder à de nouvelles mesures du gain de mer en ondes kilométriques et hectométriques, afin d'améliorer la précision des prévisions. Il conviendrait d'étudier la variation du gain de mer en fonction de la conductivité du sol. On devrait faire aussi des mesures au-dessus de bras de mer d'une largeur limitée, pour vérifier la précision de la formule figurant au § 2.3 de l'Annexe I à la Recommandation 435.

7.5 L'Annexe I à la Recommandation 435 prévoit que des trajets est-ouest proches de l'équateur d'inclinaison magnétique subissent des affaiblissements supplémentaires dus au couplage de polarisation, qui peuvent atteindre 28 dB par extrémité du trajet. Il est nécessaire de poursuivre les mesures pour confirmer cette prévision.

7.6 On manque de données détaillées sur la propagation ionosphérique au lever et au coucher du Soleil et pendant la journée entre 150 et 1600 kHz. Cette propagation diurne peut être importante, notamment pendant les mois d'hiver.

7.7 Dans le Rapport 575 et dans l'Annexe I à la Recommandation 435, on a calculé les latitudes géomagnétiques en supposant le champ magnétique assimilable à celui d'un doublet dont le milieu coïncide avec le centre de la Terre. Une représentation plus précise de la latitude géomagnétique a été établie [Hultqvist, 1958; Hakura, 1965]. D'autres études sont nécessaires pour déterminer dans quelle mesure la prévision serait améliorée si l'on utilisait la latitude géomagnétique corrigée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASSIS BRASIL, A. C. [1979] Absorção Ionosférica Noturna em Função da Frequência na Faixa de Radiodifusao (Etude de l'absorption ionosphérique nocturne en fonction de la fréquence dans les bandes de radiodiffusion en ondes hectométriques). Thèse de maîtrise es sciences. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brésil.

BARGHAUSEN, A. F. [1966] Medium frequency sky-wave propagation in middle and low latitudes. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-12, 1-14.

BARGHAUSEN, A. F. et LILLIE, D. A. [1965] Some evidence of the influence of long term magnetic activity on medium frequency sky-wave propagation, *Proc. IEEE*, 2115-2116.

BELL, C. P. et KNIGHT, P. [1978] Propagation diurne de l'onde ionosphérique en radiodiffusion sur ondes kilométriques. *Rev. de l'UER*, (Technique), **167**, 2-6.

CROMBIE, D. D. [1979] Comparison of measured and predicted signal strengths of night-time medium frequency signals in the USA. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-25, 86-89.

DAMELIN, J. [1971] Long term field strength measurements in the 550-1600 kHz frequency band, FCC Report N° R-7103. Supt. of Documents, US Govt. Office, Washington, DC 20402.

DIXON, J. M. [1960] Some medium frequency sky-wave measurements, *Proc. IRE*, Australie, Vol. 21, 407-409.

EBERT, W. [1962] Propagation ionosphérique en ondes longues et moyennes. *Rev. de l'UER*, Partie A (technique), **71**, **72**, **73**, également publiée comme Document technique 3081 de l'UER. Centre technique de l'UER.

ELLING, W. [1961] Scheinbare Reflexionshöhen und Reflexionsvermögen der Ionosphäre über Tsumeb, Südwest-Afrika, ermittelt mit Impulsen im Frequenzband von 350 bis 5600 kHz (Hauteur apparente des réflexions et taux de réflexion au-dessus de Tsumeb, Afrique du Sud-Ouest, obtenus par des impulsions dans la bande 350-5600 kHz). *AEÜ*, Vol. 15, 115-124.

EYFRIG, R., HOMUTH, H. et VOGT, K. [1975] LF and MF field strength measurements over great distances – final report. *NTZ*, Vol. 28, 30-32.

FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION [1972] Rules and Regulations, Part 73, Radio Broadcast Services. Supt. of Documents, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

FERNANDEZ, M. et WANG, J. C. H. [1980] An analysis of the Mexican sky-wave field strength data. CITEL Doc. CARR/5-80 Add. 8.

GADDEN, K. J. [1964] Magnito-ionnaya teoriya (théorie magnéto-ionique). Sbornik, Geofizika i okolozemnoe kosmicheskoe prostranstvo, *Mir*, Moscou, URSS.

HAGG, E. L. [1982] Reduction of MF sky-wave field strength at night due to magnetic-storm and winter-anomaly-related absorption. AGARD Conf. Proc. No. 305, *Medium, Long and Very Long Wave Propagation (at frequencies less than 3000 kHz)*, 29-1 à 29-9. Ed. J. S. Belrose. NASA Accession No. N82-27613. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

HAKURA, Y. [1965] Tables and maps of geomagnetic coordinates corrected by the higher order spherical harmonic terms, *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, Vol. 19, **2**, 121-157.

HULTQVIST, B. [1958] The geomagnetic field lines in higher approximation. *Arkiv för Geofysik*, Vol. 3, **4**, 63-77.

KNIGHT, P. [1977a] LF and MF sky-wave propagation: the origin of the Cairo curves. BBC Research Dept. Report 1977/42.

KNIGHT, P. [1977b] LF and MF propagation: a study of sky-wave field-strength variation. BBC Research Dept. Report 1977/12.

KNIGHT, P. [1983] Ionospheric Propagation in the LF Broadcasting Band. BBC Research Dept. Report 1983/15.

MÜLLER, K. [1965] Determination of the sky-wave field strength at short and medium distances from recordings of the total field on long and medium-wave transmitters. Techn. Mitt. RFZ, **9**, 89-95.

NEMOTO, C., FUJII, S. et INOUE, R. [juillet 1976] Long-distance propagation characteristics of MF broadcasting waves as derived from a round-Pacific mobile experiment. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 22, 118.

OUDALTSOV, A. N. [1971] O shirotnykh izmeneniyakh napryajënnosti poly ionosfernoï volny v notchnoe vremya (Variations en fonction de la latitude du champ nocturne de l'onde ionosphérique). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. II, **5**, 912.

OUDALTSOV, A. N. et SHLYUGER, I. S. [1972] Propagation curves of the ionospheric wave at night for the broadcasting range (Courbes de propagation nocturne de l'onde ionosphérique dans la gamme de radiodiffusion). *Geomag. i Aeronom.*, **10**, 894-896.

PAN, Z. [1981] MF night-time sky-wave field strength prediction. *Guangbo Yu Dianshi Jishu* (Broadcasting and Television Engineerings), Vol. 28, **3**, 1-6.

POKEMPNER, M. [1980] Comparison of available methods for predicting medium-frequency sky-wave field strengths. US Dept. of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, Report 80-42, Washington, DC.

RAU, R. [1978] Etude de la propagation sur de courtes distances dans la gamme des ondes hectométriques (en polonais). *Prace Instytutu Łączności.*

SAIN, M., RAO, M. K. et KUMAR, Y. [1968] Some studies of long-wave propagation of Radio Tashkent 164 kHz. *J. Inst. Telecomm. Engrs.* (India), Vol. 14, 533-536.

SCHWENTEK, H. et GEISWEID, K.H. [1975] Sky-wave field-strength at 845 kHz observed on board a ship at distances between 1100 and 12 000 km. *NTZ*, Vol. 28, 241-244.

TÄUMER, F. [1968] Über die Ableitung von Ausbreitungskurven im Mittelwellenbereich in der Afrikanischen Rundfunkregion. (Sur la détermination des courbes de propagation dans la bande des ondes hectométriques pour la zone africaine de radiodiffusion.) *Techn. Mitt., RFZ*, Vol. 12, 178-182.

TÄUMER, F. et STARICK, E. [1969] Jahreszeitliche Feldstärkevariationen im Lang- und Mittelwellenbereich (Variations saisonnières du champ dans les bandes des ondes kilométriques et hectométriques). *Techn. Mitt. RFZ*, Vol. 13, 16-19.

UIT [1938] Documents de la Conférence Internationale des radiocommuncations du Caire, Tome I, 425-433, Fig. 3 (voir aussi Report of Committee on Radio Wave Propagation, Proc. IRE, Vol. 26, 1193-1234, Fig. 3).

UIT [1966] Actes finals de la Conférence africaine de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques, Genève, 1966.

VILENSKY, I. M., OUDALTSOV, A. N. et CHLYUGER, I. S. [1970] (Champ des ondes radioélectriques propagées à grande distance de l'émetteur, dans la bande 150-1600 kHz). *Geomag. i Aeronom.*, **10**, 204-207.

WANG, J. C. H. [1977] Prediction of medium-frequency sky-wave field strength in North America. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-23, 43-49.

WANG, J. C. H. [1979] Medium-frequency sky-wave propagation in Region 2. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-25, 79-85.

WANG, J. C. H. [1983] Interference and sharing at medium frequency: sky-wave propagation considerations. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing, Interference and System Diversity*, 9-1 à 9-12. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1963]: Genève; 209 (OIRT).

[1963-66]: **a.** VI/208 (République populaire de Bulgarie); **b.** VI/205 (Australie); **c.** VI/75 (UER-OIRT-URTNA); **d.** VI/252 (UER).

[1966-69]: **a.** VI/186 (République fédérale d'Allemagne); **b.** VI/213 (Nouvelle-Zélande); **c.** VI/208 (UER); **d.** VI/206 (URSS).

[1970-74]: **a.** 6/177 (Australie); **b.** 6/295 (Inde); **c.** 6/97 (UER); **d.** 10/82 (URSS); **e.** 6/289 (Japon); **f.** 6/273 (Japon).

[1978-82]: **a.** 6/84 (Chine (République populaire de)); **b.** 6/239 (Groupe de travail intérimaire 6/4).

[1982-86]: **a.** 6/203 (Japon); **b.** 6/211 (Inde); **c.** Doc. 105 GTI 6/4 (Brésil); **d.** Doc. 101 GTI 6/4 (Le Président).

BIBLIOGRAPHIE

PHILLIPS, G. J. et KNIGHT, P. [1965] Effects of polarization on medium-frequency sky-wave service including the case of multihop paths. *Proc. IEE*, Vol. 112, 31-39.

WASHBURN, J. C., RUSH, C. M. et STEWART, F. G. [1982] Development of techniques to assess interference to the MF broadcasting services. NTIA Report No. 82-90. NTIS Accession No. PB-82-194598. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

RAPPORT 265-6

PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 kHz et 500 kHz ENVIRON

(Programme d'études 31D/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986)

1. Introduction

La bande des ondes kilométriques (30-300 kHz) est employée pour la navigation et pour les communications sur des distances moyennes, plus courtes que les distances globales des communications dans la bande des ondes myriamétriques (3-30 kHz), mais plus longues que les distances parcourues par l'onde de sol dans la bande de radiodiffusion à ondes hectométriques (535-1705 kHz), bien que les signaux à ondes hectométriques transmis par l'onde ionosphérique se propagent à grande distance avec un niveau d'affaiblissement relativement faible de nuit. L'utilisation de fréquences de la bande kilométrique est limitée par la largeur de bande disponible et par certaines considérations pratiques dont on parlera plus loin. Dans cette bande, aux distances auxquelles l'onde de surface devient trop faible pour être utile (distances qui dépendent de la fréquence, de l'heure, de la saison, de l'activité solaire et de la nature du sol, et qui sont de l'ordre de 500 à 1500 km), les ondes continuent encore longtemps à se propager en particulier les ondes kilométriques et plus longues, entre la Terre et la face inférieure de l'ionosphère avec une bonne stabilité et une bonne régularité. Pour une puissance rayonnée donnée, le champ augmente lorsque la fréquence diminue jusqu'à 10 à 20 kHz [Watt, 1967] et ses variations journalières, saisonnières et undécennales (cycle d'activité solaire) deviennent moins marquées. Vers le haut de la bande des ondes hectométriques, les conditions de propagation deviennent semblables à celles qui caractérisent les ondes décamétriques. Le maximum d'absorption de l'onde ionosphérique se situe entre 100 et 1000 kHz. Vu la grande longueur d'onde, les évanouissements sont caractérisés par des variations dans l'espace, les ondes ou les modes s'ajoutant vectoriellement.

Des exposés complets sur la propagation dans la gamme des ondes myriamétriques et kilométriques ont été faits par Belrose [1968] et par Burgess et Jones [1975]. Ce sujet a été réexaminé et de nouveaux résultats présentés à un colloque AGARD sur la propagation des ondes hectométriques, kilométriques et myriamétriques (voir la Bibliographie et [CCIR, 1982-86a]).

Les communications maritimes utilisent les ondes kilométriques et myriamétriques, que l'on emploie aussi dans le service fixe pendant les périodes où de fortes perturbations ionosphériques gênent l'exploitation des circuits sur ondes décamétriques, puisque les ondes longues ne sont en général pas affectées par ces phénomènes [Belrose et Ross, 1962]. Signalons comme exceptions les manifestations de protons d'origine solaire qui affectent les longues liaisons sur ondes myriamétriques traversant la calotte polaire arctique ou antarctique [Crombie, 1967; Reder et Westerlund, 1970]. Des communications avec des stations situées sous la mer ou en dessous de la surface du sol peuvent être réalisées sur ces fréquences [Moore, 1967; Durrani, 1962 et 1964; Tsao et Bettencourt, 1967]. On a admis que la propagation se fait essentiellement en polarisation verticale, laquelle se conserve bien à grande distance [Bracewell et autres, 1951]. Une restriction, en partie d'ordre économique, provient de la nécessité d'employer, à l'émission, de grandes antennes et de fortes puissances. Un autre facteur restrictif est l'augmentation du bruit atmosphérique lorsque la fréquence diminue (des bruits d'origine ionosphérique peuvent aussi prendre de l'importance aux fréquences les plus basses, dans certaines circonstances, aux latitudes élevées); aussi, outre le fait que la largeur de bande totale dont on dispose est faible, les services doivent-ils se contenter, en général, d'une largeur de bande assez étroite, ce qui signifie une faible vitesse d'écoulement des communications [Belrose et autres, 1959].

Du fait de la stabilité (en amplitude et en phase) de leur propagation, les ondes myriamétriques et kilométriques conviennent non seulement aux radiocommunications, mais également aux émissions de fréquences étalon et de signaux horaires [Blair et autres, 1967], ainsi qu'aux systèmes de radionavigation utilisant des techniques de comparaison de phase en ondes entretenues [Williams, 1951] ou des techniques de radiogoniométrie. Aux fréquences supérieures à 100 kHz, où il devient possible, dans certaines conditions, d'isoler l'onde de sol par des méthodes d'impulsions et d'échantillonnage, on peut concevoir des systèmes de signaux horaires et de navigation de grande précision [Doherty et autres, 1961].

Les travaux de recherche ont surtout porté sur les ondes myriamétriques et, à un moindre degré, sur les ondes kilométriques et hectométriques. Pour décrire la propagation, on aura intérêt à distinguer le cas où la transmission s'effectue simultanément par l'onde de sol et par une onde ionosphérique qui a subi une seule réflexion sur l'ionosphère de celui où le champ reçu est dû à des ondes réfléchies plusieurs fois sur l'ionosphère. La fréquence, la distance, la nature du sol et l'état de l'ionosphère sont autant de facteurs qui interviennent dans cette question [Wait, 1962].

Deux méthodes permettent de calculer théoriquement le champ en ondes myriamétriques, kilométriques et hectométriques:

1.1 *La méthode des «bonds»* selon laquelle on utilise une visualisation géométrique des trajectoires de l'énergie électromagnétique, entre un émetteur et un récepteur donnés, analogue à la représentation qu'on en donne en ondes décamétriques.

Cette méthode considère que la transmission radioélectrique s'effectue suivant certains «chemins», définis par une ou plusieurs réflexions ionosphériques, selon que l'on a affaire à une propagation par un ou plusieurs «bonds». Le champ total est alors la résultante vectorielle des champs dus à chaque chemin. Du fait de la grande dimension des longueurs d'onde considérées, il faut tenir compte, contrairement au cas des ondes décamétriques, de la diffraction des ondes par la surface terrestre. La méthode des bonds peut se justifier par le fait qu'en incidence oblique, les dimensions de la tranche d'altitude dans laquelle se fait la propagation sont égales ou supérieures à quelques longueurs d'onde.

Cette méthode nécessite de connaître la valeur des coefficients de réflexion de l'onde incidente sur l'ionosphère. Ils varient beaucoup avec l'altitude et le calcul théorique de ces coefficients de réflexion peut se faire de deux manières différentes:

- Si l'on considère l'ionosphère comme homogène et limitée vers le bas par un bord brusque, on peut calculer les coefficients de réflexion sur l'interface air-ionosphère, compte tenu de la polarisation de l'onde incidente, par application de la théorie des rayons. On obtient alors, en fait, une matrice de transmission et une matrice de réflexion puisque, pour une onde plane incidente, la polarisation de l'onde réfléchie est en général elliptique.
- Si l'on veut tenir compte d'un modèle ionosphérique réel, variable avec l'altitude, il est nécessaire de découper celui-ci en stratifications d'épaisseur assez petite pour que le milieu puisse y être considéré comme homogène. L'épaisseur de chaque stratification étant alors petite par rapport à la longueur d'onde, il est nécessaire d'écrire les équations différentielles auxquelles obéit chaque composante du champ électromagnétique et, en tenant compte des conditions aux limites à haute altitude, d'en trouver les solutions au-dessous de l'ionosphère. En séparant celles-ci en ondes montantes et descendantes, on peut alors déterminer les coefficients de réflexion. Cette méthode est désignée usuellement sous le nom de théorie du «champ complet».

1.2 *La méthode des «modes du guide d'ondes»*, selon laquelle on convient d'analyser la propagation comme une somme d'ondes correspondant chacune à un type de propagation dans le guide d'ondes Terre-ionosphère, analogue à un mode tel qu'on le définit pour les guides d'ondes en hyperfréquences. Le choix de la méthode à employer pour le calcul du champ repose sur des raisons pratiques de calcul numérique.

Pour les ondes myriamétriques, aux distances inférieures à 1000 km, pour les ondes kilométriques en général et pour les ondes hectométriques, les séries de modes sont lentement convergentes et il est alors nécessaire, pour le calcul, d'additionner vectoriellement un grand nombre de composantes. Au contraire, la théorie des bonds ne nécessite qu'un nombre limité de chemins, y compris l'onde de sol, et on a intérêt à l'utiliser, en tenant compte, si possible, de la diffraction, en particulier pour la propagation des ondes kilométriques et hectométriques aux grandes distances.

Pour les ondes myriamétriques, aux distances supérieures à 1000 km, la théorie des bonds nécessite l'addition vectorielle des champs dus à un grand nombre de chemins, alors qu'au contraire, les séries de modes étant rapidement convergentes, une précision suffisante peut être obtenue par addition de quelques modes seulement. La théorie des modes est donc mieux adaptée à ce cas de propagation. La propagation des ondes extrêmement longues peut, elle aussi, s'analyser en fonction d'un seul mode du guide d'ondes.

La méthode des modes du guide d'ondes est exposée en détail dans le Rapport 895.

2. Théorie de la propagation «par bonds»

2.1 *Description générale*

Dans cette théorie, on considère le champ de l'onde ionosphérique en un point (intensité et phase) comme la résultante des champs créés par différentes ondes qui se sont propagées directement depuis l'émetteur, par un ou plusieurs bonds. Le champ total en ce point est alors la résultante du champ dû à l'onde diffractée par le sol et du champ dû à l'onde ionosphérique.

Le calcul du champ de celle-ci se fait par application de la théorie des rayons dans les régions où les méthodes de l'optique géométrique s'appliquent et par intégration des effets de la diffraction [Rydbeck, 1944; Bremmer, 1949; Wait, 1961] ou par application de la théorie du champ complet [Budden, 1961; Johler, 1962; Krasnouchkine et Yablotchkine, 1963; Pitteway, 1965] dans les régions où l'optique n'est plus valide.

La géométrie d'un trajet comportant un seul bond est représentée sur la Fig. 1.

La surface de la Terre y est définie par $r = a$ et une couche réfléchissante ionosphérique régulière se trouve située à $r = a + h$. Il est commode de distinguer trois cas. Dans le premier, l'antenne de réception située en $R_<$ est illuminée par l'onde ionosphérique qui a subi une réflexion, l'antenne d'émission étant située en $T_<$. Dans ce cas, l'angle i_g est inférieur à $\pi/2$. Dans le second cas, les antennes se trouvent aux points critiques T_c et R_c pour lesquels i_g est égal à $\pi/2$. Dans le troisième cas, les antennes sont en $T_>$ et $R_>$, au-delà des points critiques, et leurs emplacements sont tels que le champ de la première onde ionosphérique se propage dans la zone de diffraction (en zone d'ombre).

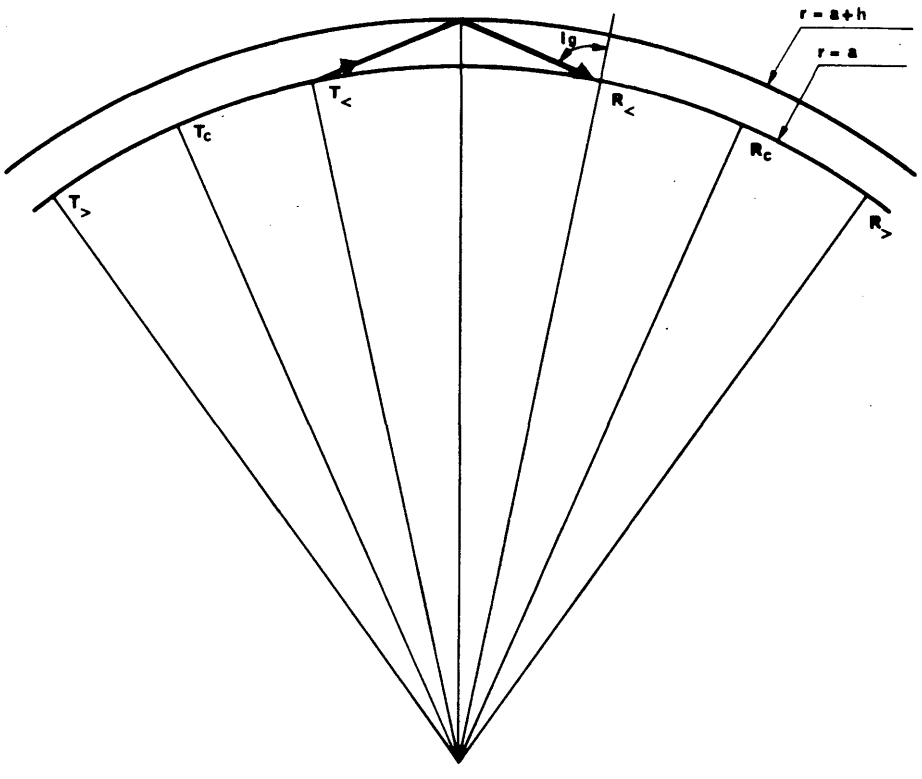


FIGURE 1 – *Géométrie du trajet du rayon dans la théorie de la propagation par bonds des ondes radioélectriques (premier bond de l'onde ionosphérique)*

2.2 *Calcul du champ de l'onde ionosphérique selon la méthode du trajet des rayons*

La composante verticale du champ électrique, rayonnée par un court doublet électrique vertical peut s'exprimer par:

$$E_u \simeq 300\sqrt{p_t} \qquad \text{mV/m à 1 km} \tag{1}$$

où p_t désigne la puissance rayonnée en kW.

Le champ de l'onde ionosphérique descendante, avant réflexion au sol au voisinage de l'antenne de réception est donné par:

$$E_t = \frac{E_u}{L} \cos\psi \; {}_{\|}R_{\|} \; DF_t \qquad \text{mV/m} \tag{2}$$

formule dans laquelle:

L : est la longueur du trajet de l'onde ionosphérique (km),

${}_{\|}R_{\|}$: est le coefficient de réflexion ionosphérique qui donne le rapport entre les composantes du champ électrique parallèles au plan d'incidence,

D : est un facteur de focalisation ionosphérique,

F_t : est le facteur d'antenne d'émission,

ψ : est l'angle au sol de départ et d'arrivée de l'onde ionosphérique, par rapport à l'horizontale.

Si la réception se fait sur un petit cadre dans le plan situé à la surface de la Terre, le champ de l'onde ionosphérique est donné par:

$$E_s = \frac{2E_u}{L} \cos\psi \; {}_{\|}R_{\|} \; DF_t \; F_r \qquad \text{mV/m} \tag{3}$$

Pour la réception sur une antenne verticale courte, la formule (3) devient:

$$E_s = \frac{2E_u}{L} (\cos\psi)^2 \; {}_{\|}R_{\|} \; DF_t \; F_r \qquad \text{mV/m} \tag{4}$$

où

F_r : facteur d'antenne de réception.

Pour la propagation sur de grandes distances, la méthode «par bonds» peut être élargie pour englober les ondes ionosphériques réfléchies plusieurs fois sur l'ionosphère. Par exemple, pour une onde ionosphérique à deux bonds, le champ reçu par une antenne cadre de réception peut être représenté par la simple formule suivante:

$$E_s = 2\frac{E_u}{L} \cos\psi \; {}_{\|}R_{1\|} \; {}_{\|}R_{2\|} \; D^2 \; D_G \; {}_{\|}R_{g\|} F_t \; F_r \tag{5}$$

où

D_G : facteur de divergence dû à la Terre sphérique, approximativement égal à D^{-1},

${}_{\|}R_{g\|}$: coefficient de réflexion effective de la Terre conductrice finie,

L : propagation totale sur le trajet du rayon à deux bonds,

${}_{\|}R_{1\|}$ et ${}_{\|}R_{2\|}$: coefficient de réflexion ionosphérique pour la première et la deuxième réflexion.

En général, les coefficients de réflexion ionosphérique ne sont pas égaux, car le degré de polarisation des ondes incidentes diffère. Cependant, la méthode simple proposée ici pour le calcul du champ, permet d'obtenir l'équivalence des valeurs de propagation ${}_{\|}R_{1\|}$ et ${}_{\|}R_{2\|}$, à titre de première approximation, pour des angles d'incidence très oblique.

2.2.1 *Angles de site et d'incidence sur l'ionosphère*

Les Fig. 2 et 3 représentent le tracé du trajet du rayon à partir duquel on détermine les angles ψ et les angles d'incidence sur l'ionosphère (i). La Fig. 2 correspond au cas d'une hauteur effective de réflexion de 70 km, ce qui représente les conditions typiques de jour; la Fig. 3 correspond au cas d'une hauteur effective de réflexion de 90 km, ce qui représente les conditions typiques de nuit. Les effets de la réfraction atmosphérique sur les angles de départ et d'arrivée [Norton, 1960] sont inclus, et représentés par la courbe en tireté; ils ne sont probablement pas valables pour des fréquences inférieures à 50 kHz environ.

2.2.2 *Longueur du trajet L et temps de propagation différentiel*

La Fig. 4 permet de calculer L et d'apprécier les variations diurnes de phase. On y voit la différence de temps de propagation entre l'onde de sol et l'onde ionosphérique ayant subi 1, 2 ou 3 réflexions sur l'ionosphère, à des hauteurs de 70 km (conditions de jour) ou de 90 km (conditions de nuit). On a admis que la vitesse de propagation est de 3×10^5 km/s.

2.2.3 *Facteur de focalisation D*

Les Fig. 5 et 6 représentent, respectivement pour les conditions de jour et de nuit, le facteur D dans le cas d'une Terre et d'une ionosphère sphérique [Wait, 1962].

2.2.4 *Facteurs d'antennes F_i et F_r*

Les Fig. 7 à 9 représentent les facteurs d'antenne qui tiennent compte de l'effet d'une Terre sphérique de conductivité finie sur le diagramme de rayonnement vertical des antennes d'émission et de réception [Wait et Conda, 1958]. Ces facteurs ont été calculés pour les cas suivants: terre, mer, glace, définis par leurs caractéristiques électriques (conductivité et permittivité) comme le montre le Tableau I ci-après:

TABLEAU I

	Conductivité σ (S/m)	*Permittivité* ε
Eau de mer	5	$80\ \varepsilon_0$
Terre	2×10^{-3}	$15\ \varepsilon_0$
Glace polaire	$2{,}5 \times 10^{-5}$	$3\ \varepsilon_0$

où ε_0 est la permittivité en espace libre.

Ces courbes ont été tracées pour un rayon terrestre fictif de 8480 km égal aux 4/3 de sa valeur réelle, ceci pour tenir compte des effets de la réfraction atmosphérique. Les facteurs F sont le rapport du champ réel à celui qui aurait été mesuré si la Terre était un conducteur parfait. Les valeurs négatives de ψ concernent la propagation au-delà de la portée limite de l'optique géométrique pour l'onde ionosphérique à un bond (voir Fig. 1 à 3).

2.2.5 *Coefficients de réflexion ionosphérique $_{\|}R_{\|}$*

La Fig. 10 représente les valeurs de $_{\|}R_{\|}$ pour le minimum de l'activité solaire. Pour tenir compte des variations en fonction de la fréquence et de la distance, les valeurs de $_{\|}R_{\|}$ sont données en fonction de $f \cos i$, f étant la fréquence émise et i l'angle d'incidence sur l'ionosphère [Belrose, 1957; Allcock, 1955; Piggott et autres, 1965]. Les courbes sont données pour les conditions de nuit (toutes saisons) et de jour (hiver et été). Les valeurs mesurées, sous incidence verticale et sous incidence oblique, sont extraites des résultats de nombreux rapports [Allcock, 1955; Al'pert et autres, 1967; Bain et autres, 1952; Belrose, 1957, 1963; Bickel, 1957; Bracewell, 1952; Bracewell et autres, 1953; Elling, 1960; Hopkins et Reynolds, 1954; Lauter et Triska, 1966; Lauter et autres, 1976; Sprenger et Lauter, 1966; Starick et Taumer, 1968; Straker, 1955; Weekes et Stuart, 1952].

Dans tous les cas les données figurant dans les divers ouvrages de références mentionnés et relatives aux coefficients de réflexion ionosphérique ont été modifiées pour tenir compte, lorsqu'il y a lieu, de la focalisation ionosphérique, des facteurs d'antennes, etc., afin de rendre les résultats des mesures compatibles avec la technique d'analyse employée.

On ne peut cependant pas toujours se fier à la notion de fréquence équivalente $f \cos i$ avec coefficients de réflexion constants [Jones et Wand, 1969]. Les courbes de la Fig. 10 sont établies à partir de données obtenues sous incidence quasi normale ($d < 200$ km); pour une incidence plus oblique ($d > 500$ km), il est probable que la notion de $f \cos i$ est applicable en première approximation pour de telles distances. En revanche, pour des distances intermédiaires, la notion de fréquence équivalente risque d'entraîner des erreurs notables sur le coefficient de réflexion car, dans des conditions de ce genre, le coefficient de réflexion et la polarisation de l'onde changent rapidement avec la distance.

Si de nombreuses données figurent sur les courbes de la Fig. 10, qui représente les variations du coefficient de réflexion ionosphérique en fonction de l'heure de la journée (à minuit et à midi) et de la saison, des travaux considérables restent à accomplir pour expliquer le mécanisme précis de ces variations au cours du cycle d'activité solaire. Le fait que pour les années d'activité solaire maximale les valeurs observées pour le coefficient de réflexion sont plus élevées pour les ondes myriamétriques que pour les ondes hectométriques, est manifestement le signe d'une variation en fonction du cycle d'activité solaire (voir la Fig. 11) [Belrose, 1968]. L'interprétation physique de ce phénomène est la suivante: pendant les années d'activité solaire maximale, la face inférieure de l'ionosphère est plus basse et la pente du gradient de densité électronique plus raide que pendant les années d'activité solaire minimale. La réflexion des ondes myriamétriques sur cette face inférieure plus basse de l'ionosphère est donc plus forte, alors que les ondes hectométriques, qui se réfléchissent au-dessus de ce niveau, sont davantage absorbées. Evidemment, il serait normal que la transition entre les valeurs les plus élevées et les valeurs les plus faibles du coefficient de réflexion s'opère en fonction de la fréquence, de l'heure de la journée, de la saison et de la période du cycle d'activité solaire. De plus, on pourrait s'attendre à une discontinuité de la courbe des coefficients de réflexion en fonction de la fréquence, pour une fréquence et une heure données. La modification très nette des valeurs des fréquences équivalentes comprises entre 35 et 45 kHz qui apparaît dans les données relatives aux années d'activité solaire maximale, n'apparaît pas en revanche dans les données présentées dans le présent Rapport.

Il convient de noter que la gamme de fréquences de la bande de radiodiffusion en ondes hectométriques pour la propagation oblique est contenue dans la gamme des fréquences équivalentes, pour lesquelles la réflectivité ionosphérique varie en sens inverse de l'activité solaire; c'est-à-dire que la propagation d'une onde de fréquence de 1600 kHz sur un trajet de 1500 km correspond à celle d'une onde de fréquence équivalente de 278 kHz; à 500 kHz, la fréquence équivalente est 86 kHz. Un exemple de calcul par la méthode de tracé des rayons est donné à l'Annexe I.

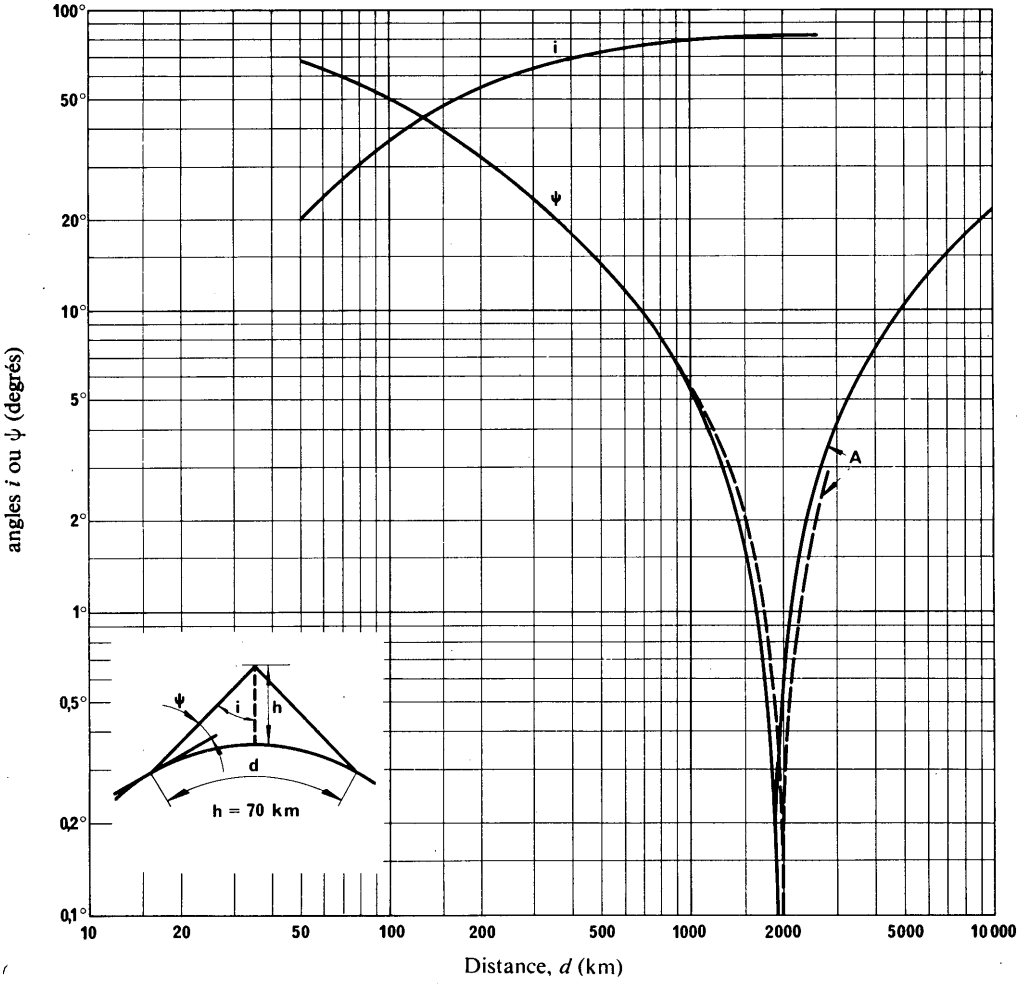


FIGURE 2 – *Angles de départ et d'arrivée (ψ) et angles d'incidence sur l'ionosphère (i) dans des conditions diurnes types (h=70 km). La courbe en tiret tient compte des effets de la réfraction atmosphérique*

A: ψ négatif

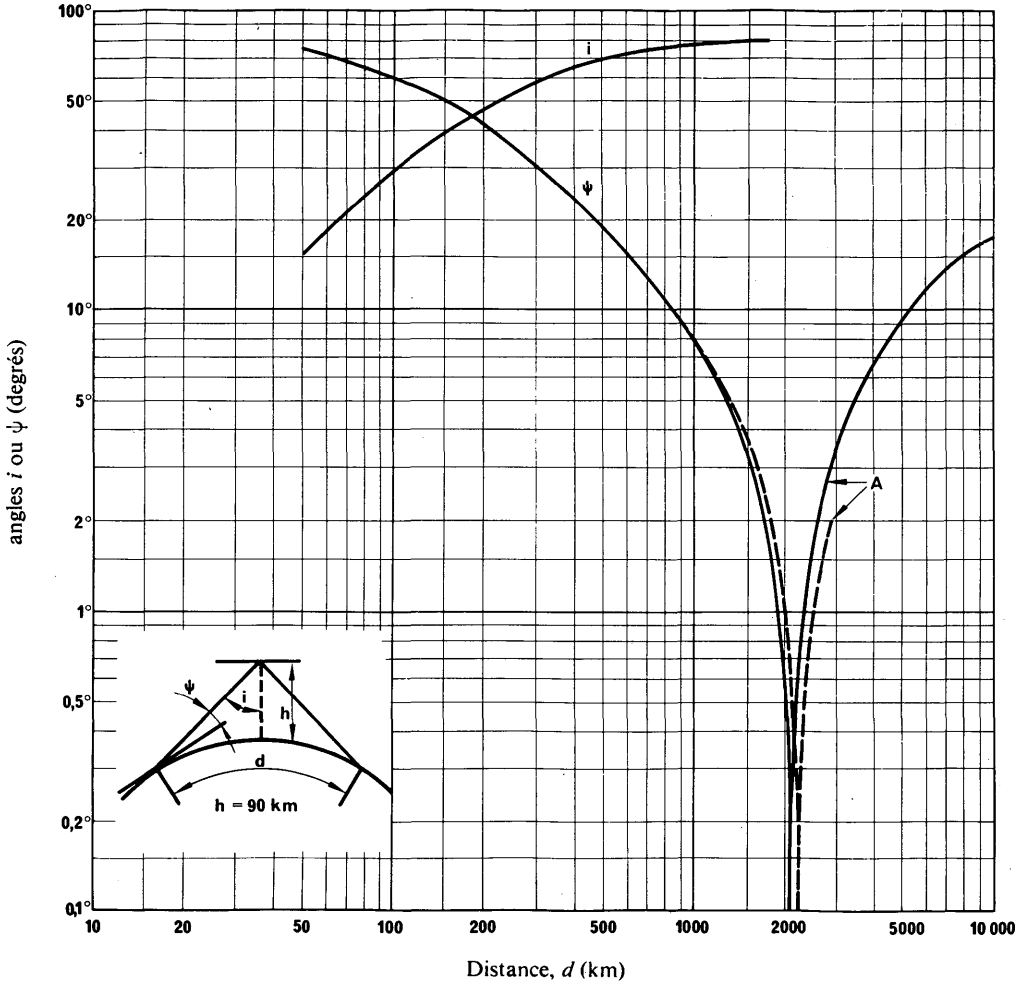


FIGURE 3 – *Angles de départ et d'arrivée (ψ) et angles d'incidence sur l'ionosphère (i) dans des conditions nocturnes types (h=90 km). La courbe en tiret tient compte des effets de la réfraction atmosphérique*

A: ψ négatif

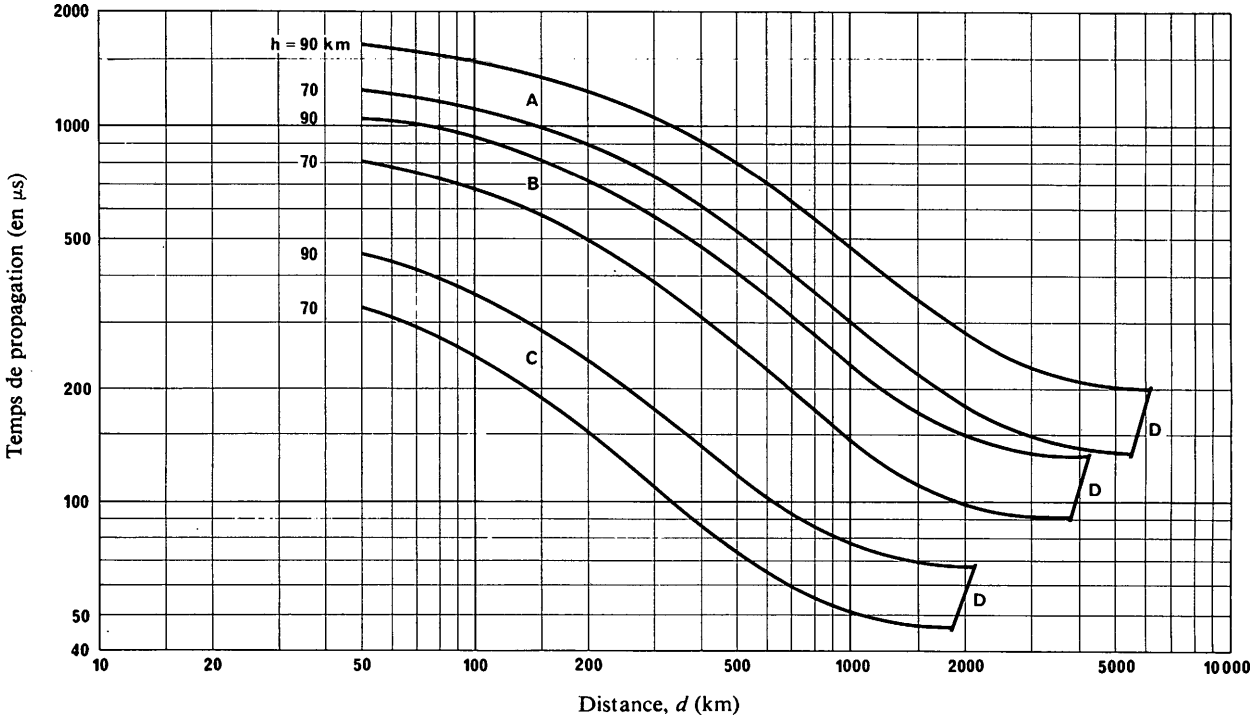


FIGURE 4 – *Temps de propagation différentiel entre une onde de sol et des ondes ionosphériques avec un, deux et trois bonds*

A: 3 bonds
B: 2 bonds
C: 1 bond
D: portée limite

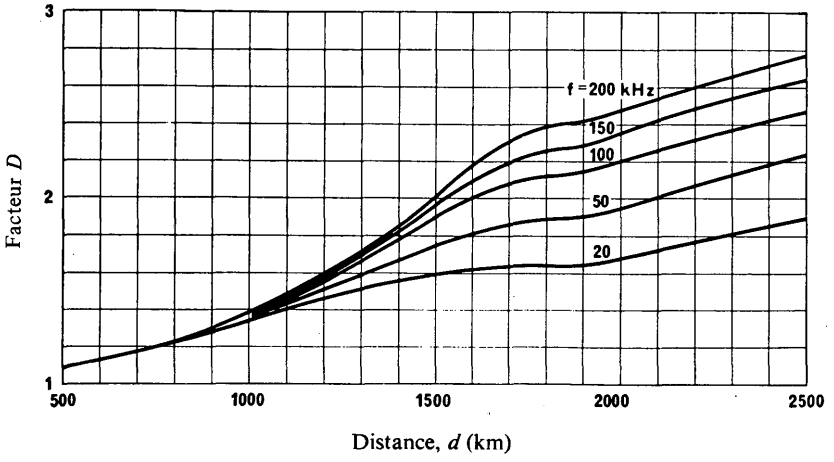


FIGURE 5 – *Facteur de focalisation ionosphérique – jour*

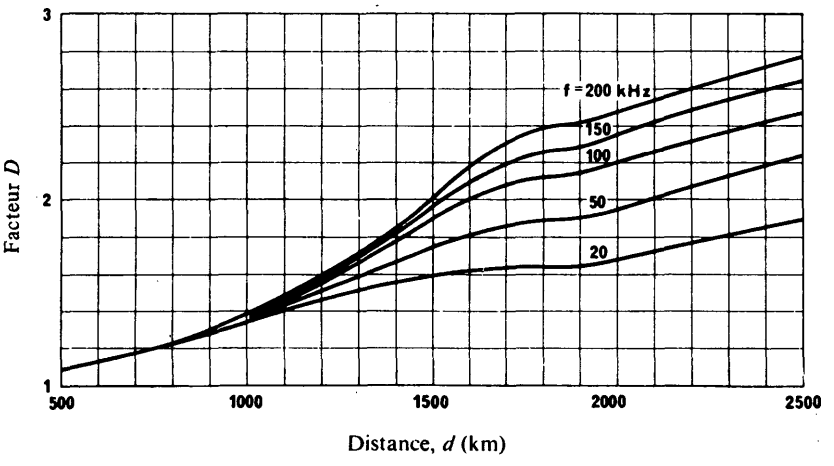


FIGURE 6 – *Facteur de focalisation ionosphérique – nuit*

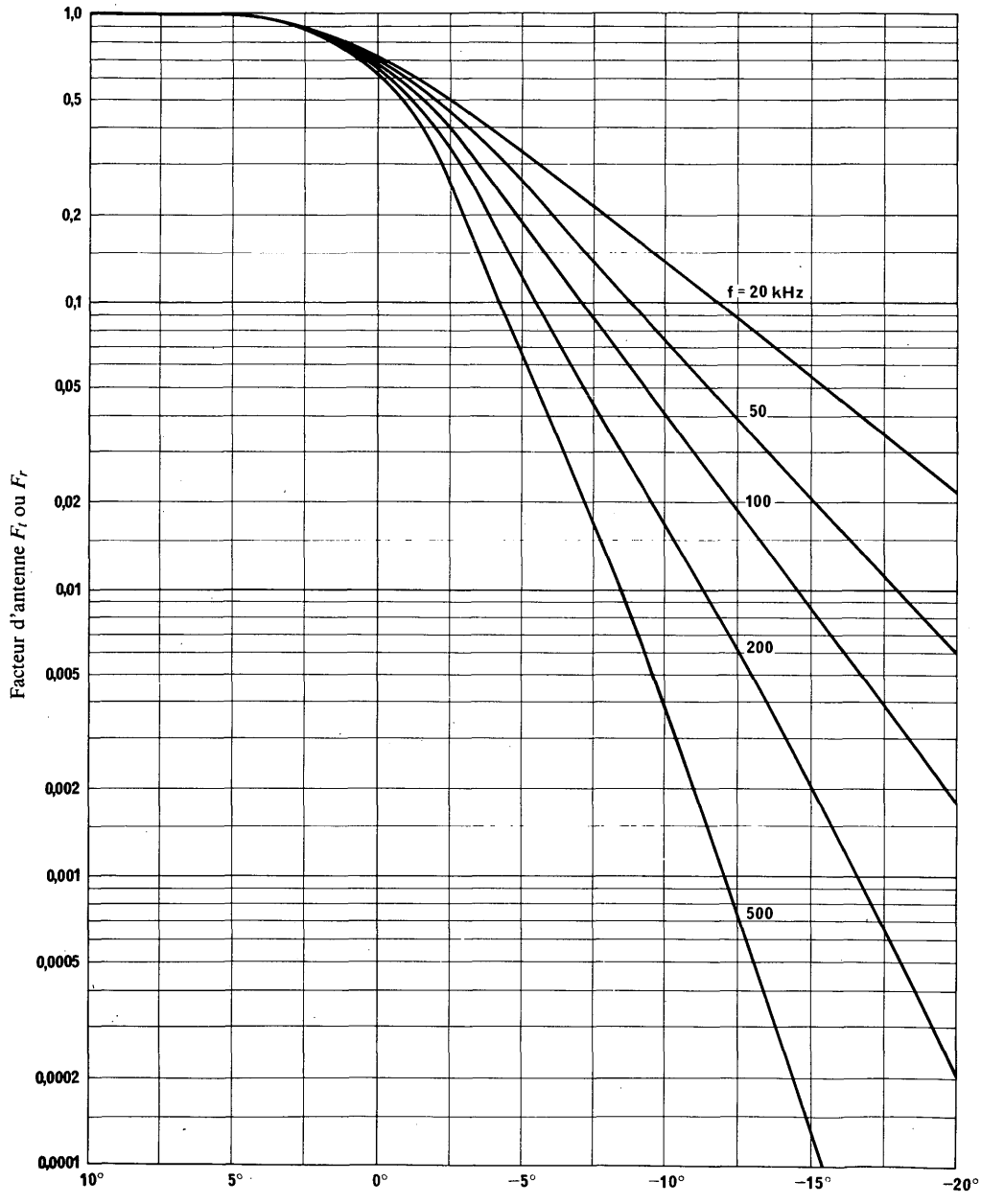


FIGURE 7 – *Facteur d'antenne*

Eau de mer

$\varepsilon = 80\ \varepsilon_0$
$\sigma = 5$ S/m
$a = 4/3 \times 6360$ km

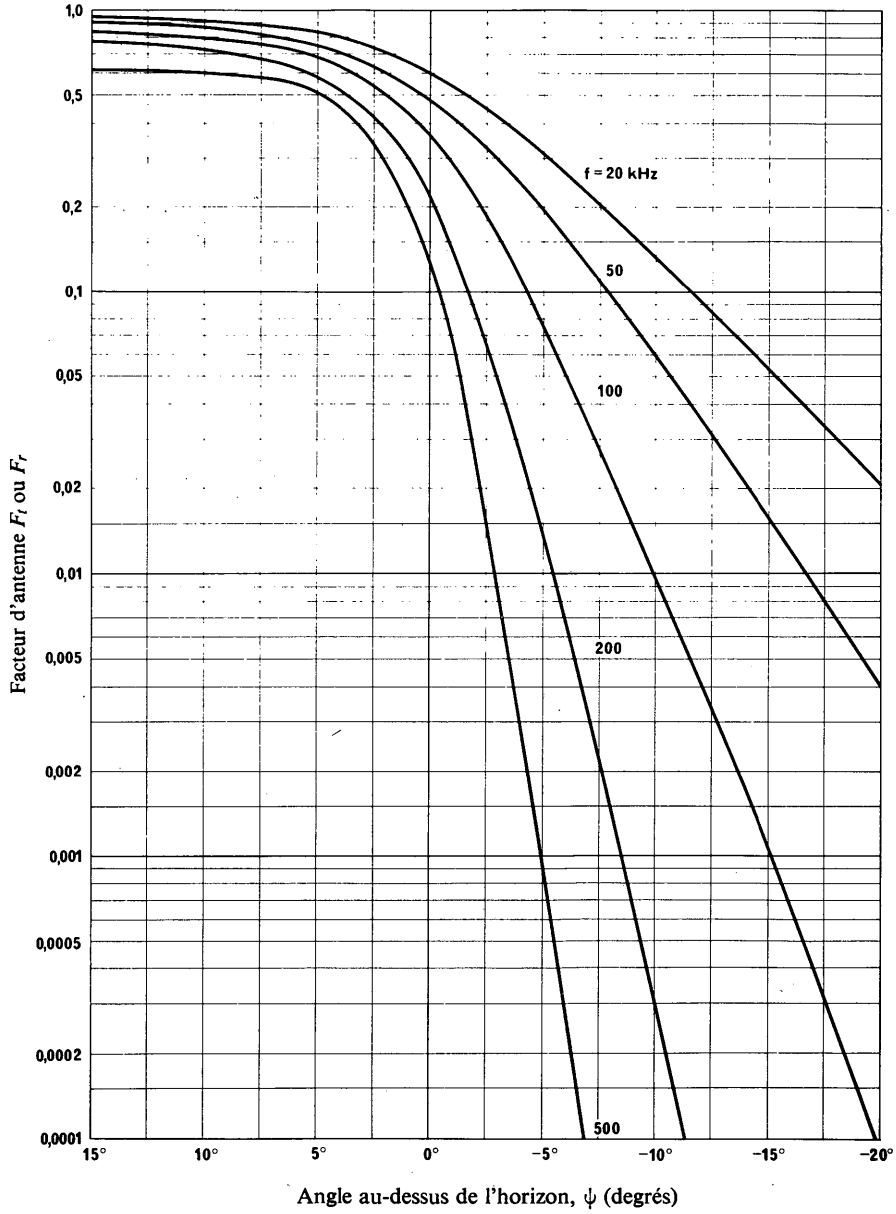


FIGURE 8 – *Facteur d'antenne*

Terre

$\varepsilon = 15\ \varepsilon_0$
$\sigma = 2 \times 10^{-3}$ S/m
$a = 4/3 \times 6360$ km

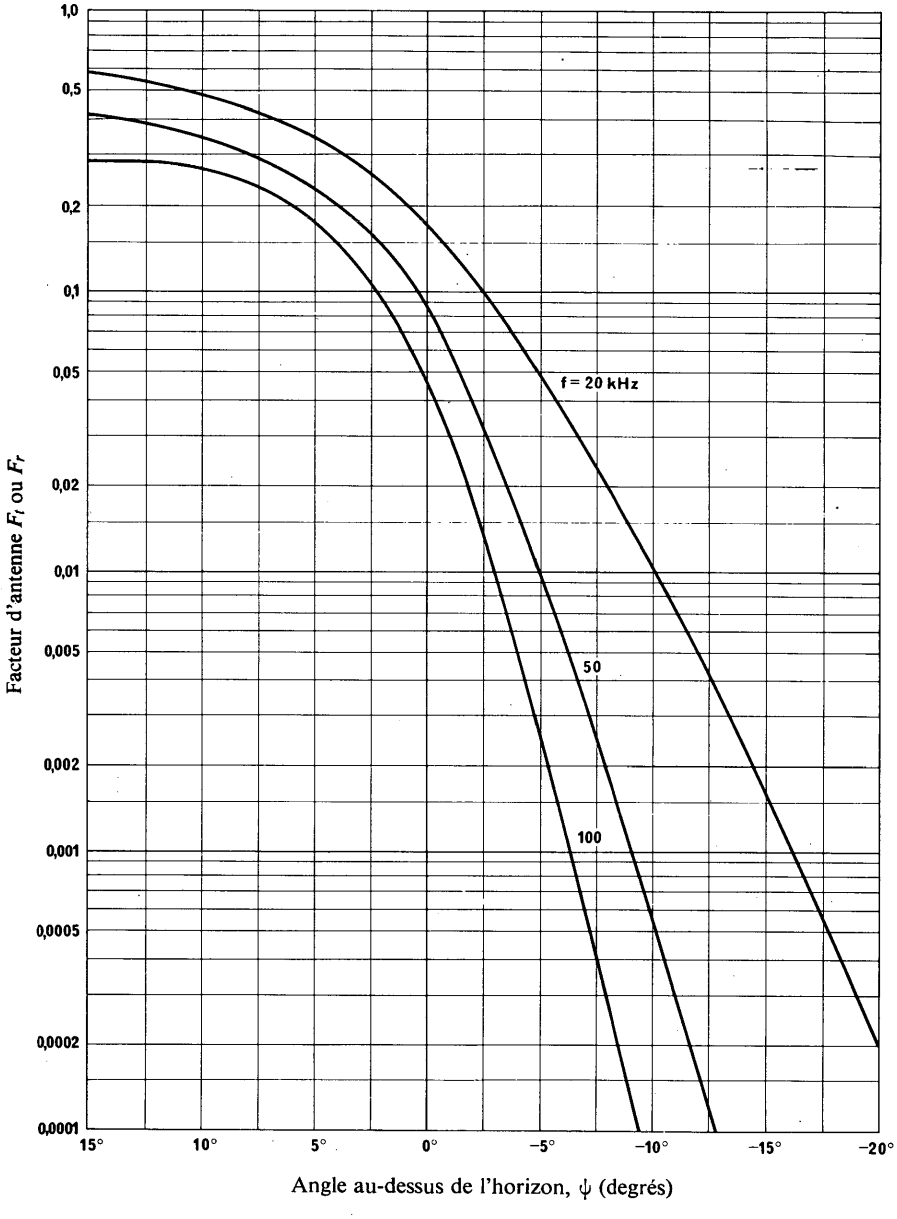


FIGURE 9 – *Facteur d'antenne*

Glace à –4 °C

$\varepsilon = 3\ \varepsilon_0$
$\sigma = 0{,}025 \times 10^{-3}$ S/m
$a = 4/3 \times 6360$ km

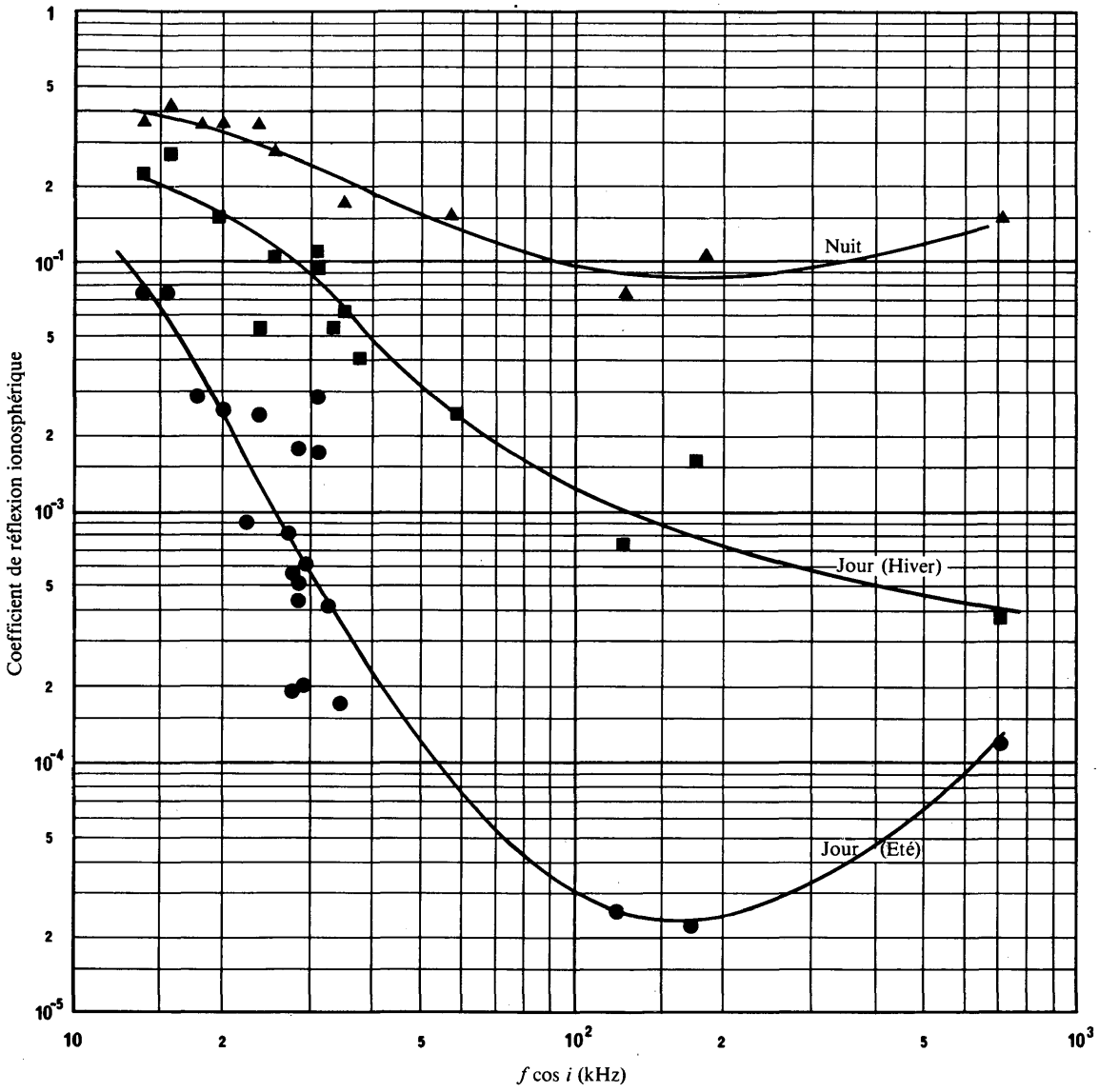


FIGURE 10 – *Coefficents de réflexion ionosphérique – Conditions d'activité solaire minimale*

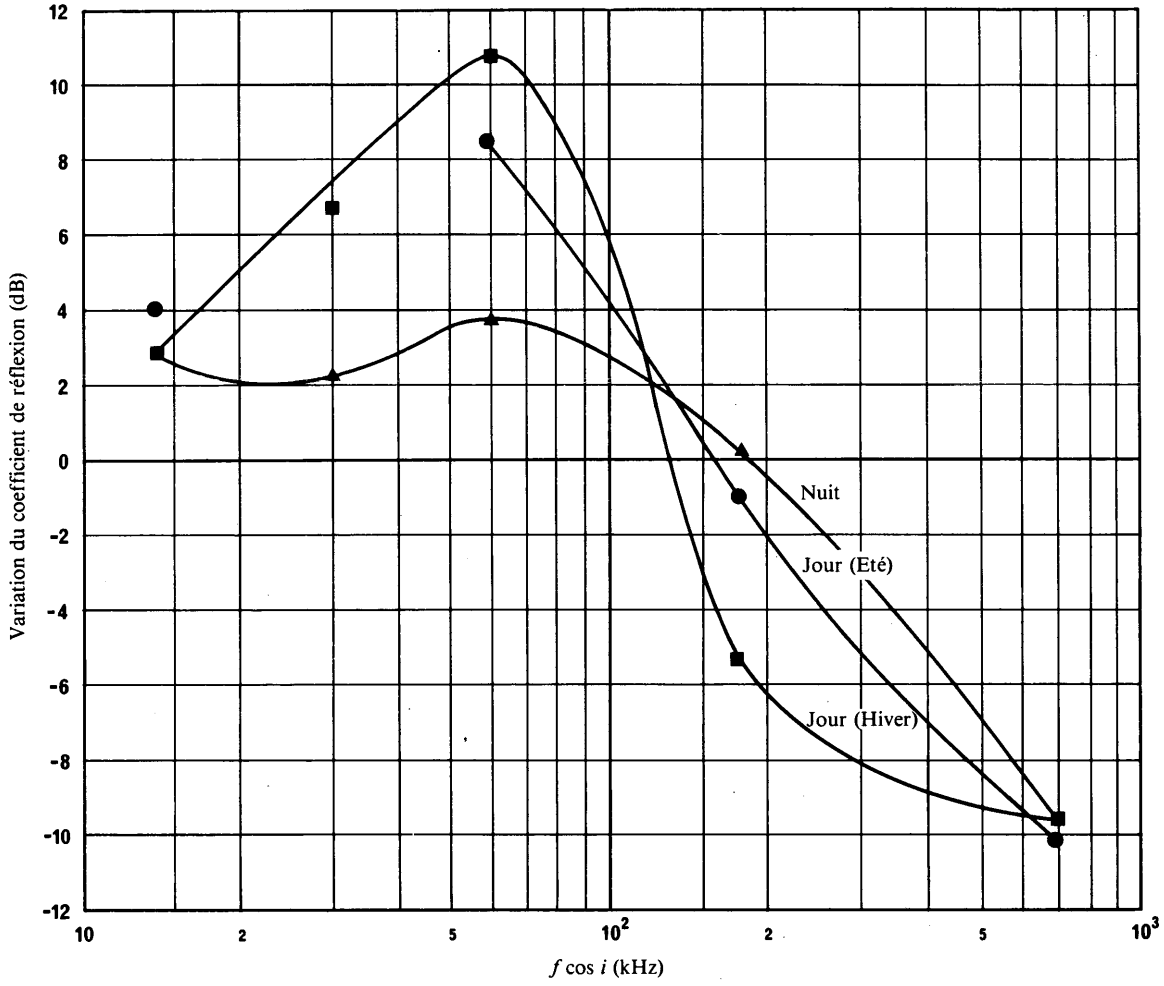


FIGURE 11 – *Variations du coefficient de réflexion (dB) des années d'activité solaire minimale aux années d'activité solaire maximale en fonction de la fréquence équivalente et de l'heure*

2.3 *Calcul du champ par la méthode du «champ complet»* («full wave»)

Dans cette méthode, on utilise les solutions du champ complet, pour les divers bonds composant chaque chemin, que permettent aujourd'hui de calculer les ordinateurs rapides [Wait, 1961; Berry, 1964]. Une comparaison entre la méthode décrite précédemment et la méthode du champ complet a été faite par Berry [1967]. Un rapport de Berry et Christman [1965] contient des courbes d'amplitude et de phase et expose une méthode permettant de séparer les effets des réflexions ionosphériques d'avec ceux de la propagation par diffraction, d'une manière analogue à celle décrite dans la méthode des trajets des rayons. Pour les calculs du champ complet selon la méthode des bonds, il existe un programme d'ordinateur [Berry et Herman, 1971].

3. Travaux futurs

On commence à connaître assez bien la théorie de la propagation des ondes myriamétriques kilométriques et hectométriques, nécessaire pour évaluer les valeurs du champ. On a recours à deux théories concurrentes pour décrire la propagation des ondes myriamétriques et kilométriques: la théorie des bonds et la théorie des modes du guide d'ondes. Les solutions données par la première conviennent généralement le mieux aux courtes distances et aux fréquences les plus élevées (ondes kilométriques et hectométriques); la seconde convient le mieux aux distances plus longues et aux fréquences les plus basses (ondes myriamétriques).

La théorie des bonds décrit la propagation au moyen de termes qui correspondent à des grandeurs physiques qu'un ingénieur radioélectricien peut aisément se représenter.

Il semble possible à présent, tout au moins en ce qui concerne les trajets en ondes myriamétriques, d'obtenir des prévisions de propagation plus satisfaisantes sur la base de calculs appliquant la théorie de l'onde complète, avec modèles ionosphériques donnés, que sur la base de courbes comme celles de la Fig. 10 et 11. Il convient de poursuivre les efforts en vue de réaliser ces modèles ionosphériques pour la région D, en commençant par des modèles relatifs aux heures de nuit et à midi, pour des saisons, des latitudes et des activités solaires différentes.

Divers articles [Bain et Harrison, 1972; Belrose et Segal, 1974; Berry, 1977; Coyne et Belrose, 1972; Mechtly et autres, 1972; Monbriand et Belrose, 1979; Rowe et autres, 1974; Thomas et Harrison, 1970] font mention de distributions de densité électronique qui peuvent aussi servir de modèles dans des conditions données. Des indications sur la construction de modèles à utiliser dans d'autres conditions ont été fournies par Bain [1981], Belrose et Segal [1974].

Il convient de faire une étude d'ensemble portant sur une comparaison des solutions obtenues par la méthode des trajets des rayons (avec corrections de diffraction) et par celle des bonds afin d'établir la validité des approximations propres à la première de ces méthodes.

Il existe actuellement trop peu de données pour pouvoir établir des coefficients de réflexion ionosphérique révisés en fonction de la fréquence, de la distance, de la saison, de l'activité solaire et géomagnétique ainsi que d'autres caractéristiques. Pour cette raison, il n'a pas été possible de faire des comparaisons valables entre les diverses méthodes théoriques décrites ci-dessus et les résultats expérimentaux, si bien qu'on ne possède pas de preuves concluantes de l'utilité de ces méthodes.

En ce qui concerne la fiabilité des courbes des coefficients de réflexion, Bell et Knight [1978] ont observé que les valeurs de champ mesurées de jour entre Varsovie et Kingswood, 227 kHz/1370 km ($f \cos i = 31{,}6$ kHz) et entre Tipaza et Kingswood, 251 kHz/1650 km (30,6 kHz), sont supérieures aux valeurs prévues sur la courbe d'été pour le minimum d'activité solaire. Mais ils observent que les valeurs de champ en été peuvent subir l'influence des ondes de sol étant donné qu'ils ont mesuré le champ total. En revanche, les mesures de champ effectuées pour les trajets Rome-Kolberg, 845 kHz/1143 km (154 kHz) et Monte Carlo-Kolberg, 1466 kHz/1050 km (280 kHz), ont montré que la variation diurne observée en été est supérieure à la variation prévue sur les courbes [Taumer et Starick, 1969]. Il convient de noter que si la Fig. 10 a été redessinée, et que des données supplémentaires ont été ajoutées, la précision des courbes n'en a pas été améliorée. Les valeurs des données d'été accusent une dispersion (de $+15$ dB à -8 dB pour $f \cos i \sim 30$ kHz), et on ne dispose pas de données pour $f \cos i > 40$ kHz pour la propagation à grande distance. Il convient de noter que pour toutes les données relatives à l'incidence oblique à l'exception d'une série d'observations, les coefficients de réflexion ionosphérique ont été déterminés à partir du brouillage maximal et minimal de l'onde ionosphérique et de l'onde de sol, selon la méthode employée initialement par Bracewell et autres [1951] et Belrose [1957, 1968], puis par Starick et Taumer [1968]. Quelques points des données ont été déterminés à partir d'émissions d'impulsions de type Loran de 180 kHz, à partir d'observations rapportées par Crichlow et autres [1946], ce qui a permis de discerner clairement l'onde ionosphérique. L'analyse de données relatives à la propagation à la fréquence de 40 kHz recueillies au Japon en 1978 et 1979 montre que le champ de l'onde ionosphérique des ondes kilométriques est renforcé pendant les jours d'anomalie d'hiver de l'absorption ionosphérique; le coefficient de réfexion augmente de 3 dB et sa moyenne mensuelle varie avec les saisons de façon discontinue; elle est de 0,22 en hiver (novembre-mai) et de 0,12 en été (juin-octobre) [CCIR, 1982-86b].

Il faudra faire d'autres mesures pour mettre en évidence les différences aux latitudes basses, moyennes et élevées. Il a été indiqué, par exemple [Watt et Plush, 1959; Belrose, 1968; Morfitt, 1977] que la faible conductivité du sol dans les régions arctiques produit des effets notables.

Pour procéder à ces mesures, il serait bon d'utiliser un avion se déplaçant sur des arcs de grand cercle entre les émetteurs et les stations de réception du champ. Dans ces conditions, les récepteurs fixes servant à contrôler en permanence les signaux pourraient être utilisés pour déterminer les variations des paramètres de propagation provoquées par les variations journalières et saisonnières; ils permettraient également de déterminer les changements imputables aux différences d'activité solaire.

Une autre méthode consiste à faire des mesures par fusées ou à partir d'installations au sol pour déterminer les variations verticales de la densité électronique dans la basse ionosphère. Les profils ainsi obtenus serviraient à calculer les coefficients de réflexion ionosphérique; ils permettraient aussi de calculer les paramètres de propagation en vue de leur comparaison avec les résultats expérimentaux [Belrose et Segal, 1974]. Il est nécessaire notamment d'effectuer des mesures de la densité électronique à des hauteurs inférieures à 70 km, pour lesquelles on relève des divergences importantes dans les résultats d'observation obtenus, pendant la nuit et aux basses latitudes.

4. Comparaison avec les méthodes du CCIR pour la prévision du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences supérieures à 150 kHz environ

Le Rapport 575 expose différentes méthodes permettant de calculer le champ nocturne des ondes kilométriques et au-delà jusqu'à 1705 kHz. Il conviendrait de comparer les résultats obtenus par l'application des méthodes proposées dans le présent Rapport et le Rapport 575. Les champs prévus à l'aide des différentes méthodes doivent certainement être concordants lorsque les fréquences et les distances sont les mêmes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLCOCK, G. McK. [1955] Ionospheric absorption at low and medium frequencies. *The Phys. of the Ionosphere* (The Phys. Soc. of London), 14-19.

AL'PERT, Ya. L., GUSEVA, E. G. et FLIGEL, D. S. [1967] *Propagation of LF electro-magnetic waves in the earth-ionosphere waveguide.* Academy of Sciences of the USSR.

BAIN, W. C. [1981] Models of the ionospheric D region at noon. IEE Conf. Proc. 195, 203-206.

BAIN, W. C., BRACEWELL, R. N., STRAKER, T. W. et WESCOTT, C. H. [1952] The ionospheric propagation of frequency 16 kc/s over distances of about 540 km. *Proc. IEE Monograph*, 37, **99** (Pt. IV), 250.

BAIN, W. C. et HARRISON, M. D. [1972] Model ionosphere for D region at summer noon during sunspot maximum. *Proc. IEEE*, Vol. 119, 790-796.

BELL, C. P. et KNIGHT, P. [1978] Daytime propagation in the LF broadcasting band, *Rev. de l'UER* (technique), **167**, 3-7.

BELROSE, J. S. [1957] Some investigations of the lowest ionosphere. Ph. D. Thesis Univ. of Cambridge, first copy, 1956; revised copy.

BELROSE, J. S. [1963] The oblique reflection of low-frequency radio waves from the ionosphere. *Propagation of radio waves* at frequencies below *300 kc* (ed. Blackband), Agardograph 74, 149-165, Pergamon Press.

BELROSE, J. S. [1968] Low and very low frequency radio wave propagation. AGARD Lecture Series XXIX, NTIS Accession No. AD676788, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BELROSE, J. S., HATTON, W. L., McKERROW, C. A. et THAIN, R. S. [1959] The engineering of communication systems for low frequencies. *Proc. IRE*, Vol. 47, 661.

BELROSE, J. S. et ROSS, D. B. [1962] Observations of unusual LF propagation made during polar cap disturbance (PCD) events. *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, Supplement A-II (Int. Conf. on Cosmic Rays and the Earth Storm), 126-130.

BELROSE, J. S. et SEGAL, B. [1974] On interpretation of CW propagation data for long radio waves. Methods of Measurements and Results of Lower Ionosphere Structure. COSPAR Symposium, Akademic-Verlag, Berlin, 77-109.

BERRY, L. A. [1964] Wave-hop theory of long distance propagation of low frequency radio waves. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 1275-1284.

BERRY, L. A. [1967] Wave-hop radio propagation theory. Conf. on MF, LF and VLF radio propagation, IEE Conf. Publ., 36, 63-69.

BERRY, L. A. [1977] A revised model of the electron density in the lower ionosphere, Command and Control Technical Centre (DCA), Tech. Rep. 111-77, NTIS Accession No. AD17883. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.

BERRY, L. A. et CHRISTMAN, M. E. [1965] Numerical values of the path integrals for low and very low frequencies, NBS Tech. Note No. 319. Supt. of Documents, U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC, 20402.

BERRY, L. A. et HERMAN, J. E. [1971] A wave-hop propagation program for an anisotropic ionosphere. OT Telecom. Res. Rept. 11 (GPO Stock No. 0300-0316). Office of Telecommunications, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.

BICKEL, J. E. [1957] A method for obtaining reflection coefficients and its application to 135.6 kc/s data in the Alaskan area. *J. Geophys. Res.*, Vol. 62, 373-381.

BLAIR, B. E., CROW, E. L. et MORGAN, A. H. [1967] Five years of VLF world-wide comparison of atomic frequency standards. *Radio Sci.*, Vol. 2, (new series), 627-636.

BRACEWELL, R. N. [1952] The ionospheric propagation of radio waves of frequency 16 kc/s over a distance of about 200 km. *Proc. IEE*, Vol. 99 (Pt. IV), 217.

BRACEWELL, R. N., BUDDEN, K. G., RATCLIFFE, J. A., STRAKER, T. W. et WEEKES, K. [1951] The ionospheric propagation of low and very low-frequency radio waves over distances less than 1000 km. *Proc. IEE*, Vol. 98 (Pt. III), 221-236.

BRACEWELL, R. N., HARWOOD, J. et STRAKER, T. W. [1953] The ionospheric propagation of radio waves of frequency 30-65 kc/s over short distances. *Proc. IEE, Monograph*, **84**.

BREMMER, H. [1949] *Terrestrial radio waves.* Elsevier Pub. Co., London, Royaume-Uni.

BUDDEN, K. G. [1961] *Radio waves in the ionosphere.* Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

BURGESS, B. et JONES, T. B. [1975] The propagation of LF and VLF radio waves with reference to some systems applications. *Radio and Electron. Engr.*, Vol. 45, 47-61.

COYNE, T. N. R. et BELROSE, J. S. [1972] The diurnal and seasonal variation of electron densities in the mid-latitude D region under quiet conditions, *Radio Sci.*, Vol. 7, 163-174.

CRICHLOW, W. Q., HERBSTREIT, J. W., JOHNSON, E. M. et SMITH, C. E. [1946] Measurement technique and analysis of low frequency Loran system. Report No. ORS-P-23-S, Operational Res. Staff, Washington, DC., Etats-Unis d'Amérique.

CROMBIE, D. D. [1967] The waveguide mode propagation of VLF radio waves to great distances. IEE (London) Conf. Publ., 36.

DOHERTY, R. H., HEFLEY, G. et LINFELD, R. F. [1961] Timing potentials of Loran-C. *Proc. IRE*, Vol. 49, 1659-1673.

DURRANI, S. H. [1962] Air-to-undersea communication with electric dipoles, *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-10, 524-528.

DURRANI, S. H. [1964] Air-to-undersea communication with magnetic dipoles. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-12, 464-470.

ELLING, W. [1960] Scheinbare Reflexionshöhen und Reflexionsvermögen der Ionosphäre über Tsumeb, Südwest-Afrika, ermittelt mit Impulsen im Frequenzband von 350 bis 5600 kHz (Mesures par impulsions des hauteurs virtuelles et des coefficients de réflexion de l'ionosphère au-dessus de Tsumeb (ouest de l'Afrique Australe) dans la bande des fréquences de 350 à 5600 kHz). *AEÜ* **15**, 115-124.

HOPKINS, H. G. et REYNOLDS, L. G. [1954] An experimental investigation of short distance ionospheric propagation at low and very low frequencies. *Proc. IEE*, **101** (Pt. III), 21-34.

JOHLER, J. R. [1962] Propagation of low frequency radio signal. *Proc. IRE*, **50**, 404-427.

JONES, T. B. et WAND, I. C. [1969] Validity of the $f \cos i$ theorem for the absorption of very low frequency radiowaves in the ionosphere. *Nature*, Vol. 222, 462-463.

KRASNOUCHKINE, P. Y. et YABLOTCHKINE, N. A. [1963] *The propagation theory of ultra-long waves.* Mathematical Institute, Academy of Sciences, Moscou, URSS.

LAUTER, E. A. et TRISKA, P. [1966] Jahresgang der ionosphärischen Absorption im Mittel-und Langwellenbereich (Absorption des ondes hectométriques et kilométriques dans l'ionosphère tout au long de l'année). *Veröffentlichung des National Komitees für Geophysik und Geodäsie*, II, **1**, 23-30.

LAUTER, E. A., TAUBENHEIM, J., ENTZIAN, G., BREMER, J., COSSART, G. V. et KLEIN, G. [1976] Middle atmosphere processes and lower ionosphere in winter. Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, Report HH1-STP No. 7.

MECHTLY, E. A., BOWHILL, S. A. et SMITH, L. G. [1972] Changes of lower ionosphere electron concentration with solar activity. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, Vol. 34, 1899-1907.

MONTBRIAND, L. E. et BELROSE, J. S. [1979] Diurnal and seasonal variations of the steady state loss coefficient in the D-region, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1921-1929.

MOORE, R. K. [1967] Radio communication in the sea. *IEEE Spectrum*, **4**, 42-51.

MORFITT, D. G. [1977] Effective electron density distribution describe VLF/LF propagation data. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. TR 141. NTIS Accession No. AD A047508, National Technical Information Service, Springfield, VA, 22161, Etats-Unis d'Amérique.

NORTON, K. A. [1960] Low and medium frequency propagation. *Electro-magnetic wave propagation*, 375-444, Academic Press.

PIGGOTT, W. R., PITTEWAY, M. L. V. et THRANE, E. V. [1965] The numerical calculation of wave fields, reflexion coefficients and polarizations for long radio waves in the lower ionosphere. II, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A-257, 243.

PITTEWAY, M. L. V. [1965] The numerical calculation of wave fields, reflexion coefficients and polarizations for long radio waves in the lower ionosphere. I, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A-257, 219-241.

REDER, F. H. et WESTERLUND, S. [1970] VLF signal phase instabilities produced by propagating medium – experimental results. Phase and Frequency Stabilities in Electromagnetic Wave Propagation (édit. K. Davies), Technivision, Slough, Royaume-Uni.

ROWE, J. N., MITRA, A. P., FERRARO, A. J. et LEE, H. S. [1974] An experimental and theoretical study of the D region – II. A semi-empirical model for mid-latitude D Region, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, Vol. 36, 755-785.

RYDBECK, O. E. H. [1944] On the propagation of radio waves. *Trans. Chalmers Univ. Technol. Gothenberg*, **34.**

SPRENGER, K. et LAUTER, E. A. [1966] Verfahren zur Messung der ionosphärischen Absorption nach A3 – Method im Lang-und Mittelwellenbereich (Méthodes de mesure de l'absorption ionosphérique selon la méthode A3 dans des bandes des ondes longues et des ondes moyennes), *Veröffentlichung des National Komittees für Geophysicik und Geodäsie*, II, 47-66.

STARICK, E. et TAUMER, F. [1968] Die Ausbreitung der Langwellen am Tage in der D-Region der Ionosphäre (Diffusion des ondes longues de jour dans la Région D de l'ionosphère). *Techn. Mitt. RFZ*, 12 Jahrgang, Heft 2, 89-96.

STRAKER, T. W. [1955] The ionospheric propagation of radio waves of frequency 16 kHz over short distances. *Proc. IEE, Monograph 114.*

TAUMER, F. et STARICK, E. [1969] Jahreszeitliche Feldstärkevariationen im Lang-und Mittwellenbereich (Variations saisonnières de la force du champ dans les bandes des ondes longues et des ondes moyennes). *Techn. Mitt. FRZ*, 13 Jahrgang, Heft 1, 16-19.

THOMAS, L. et HARRISON, M. D. [1970] The electron density distributions in the D region during the night and pre-sunrise period. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 1-14.

TSAO, C. K. H. et BETTENCOURT, J. T. [1967] Subsurface radio communication. Conf. on MF, LF and VLF Propagation. IEE Conf. Publ., **36**, 313-317.

WAIT, J. R. [1961] A diffraction theory for LF sky wave propagation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 1713-1724.

WAIT, J. R. [1962] Introduction to the theory of VLF propagation. *Proc. IRE*, Vol. 50, 1624-1647.

WAIT, J. R. et CONDA, A. M. [1958] Pattern of an antenna on a curved lossy surface. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-6, 348.

WATT, A. D. [1967] *VLF Radio Engineering.* Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WATT, A. D. et PLUSH, R. W. [1959] Power requirements and choice of an optimum frequency for a world-wide standard frequency broadcasting station. *NBS J. Res.*, Vol. 63D (Radio Prop.), 35-44.

WEEKES, K. et STUART, R. D. [1952] The ionospheric propagation of radio waves with frequencies near 100 kc/s over short distances. *Proc. IEE*, **99** (Pt. IV), 29.

WILLIAMS, C. [1951] Low-frequency radiowave propagation by the ionosphere, with particular reference to long-distance navigation. *Proc. IEE*, **98** (Pt. III), 81-89.

Documents du CCIR

[1982-86]: **a.** 6/228 (GTI 6/5); **b.** 6/37 (Japon).

BIBLIOGRAPHIE

BELROSE, J. S. [février 1982] Ed. AGARD Conf. Proc. No. 305, *Medium, Long and Very Long Wave Propagation (at frequencies less than 3000 kHz).* NASA Accession No. N82-27613. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

ANNEXE I

EXEMPLE D'UN CALCUL COMPLET DU CHAMP (AMPLITUDE ET PHASE)

Soit à calculer le champ attendu dans les conditions suivantes: activité solaire minimale, été, heures de jour, court doublet vertical à l'émission et à la réception, et pour les valeurs numériques suivantes:

Longueur du trajet	$d = 1911$ km
Fréquence	$f = 80$ kHz
Emplacement d'émission sur terre	$\sigma = 2 \times 10^{-3}$ S/m $\varepsilon = 15\ \varepsilon_0$
Emplacement de réception sur mer	$\sigma = 5$ S/m $\varepsilon = 80\ \varepsilon_0$
Puissance rayonnée	$p_t = 0{,}4$ kW

Les étapes successives du calcul sont les suivantes:

Etape	Paramètre	Figure	Terme calculé	Valeur
1	$p_t = 0{,}4$ kW		$E_u = 300\sqrt{0{,}4}$	$= 190$ mV/m
2	$d = 1911$ km	2	ψ i	$\approx -0{,}36°$ $= 81°$
3	$\psi = -0{,}36°$	8	F_t	$= 0{,}36$
4	$\psi = -0{,}36°$	7	F_r	$= 0{,}67$
5	$d = 1911$ km $c = 3 \times 10^5$ km/s	4	$L-d$ $L = 1911 + (46 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5)$	$= 46$ µs $= 1925$ km
6	$d = 1911$ km	5	D	$= 2{,}16$
7	$f = 80$ kHz $i = 81°$		$f \cos i = 80 \cos 81°$	$= 12{,}5$ kHz
8	$f \cos i = 12{,}5$ kHz activité solaire minimale, jour (été)	10	$\|\|R\|\|$	$= 0{,}11$
9			E_s	$= 11{,}4 \times 10^{-3}$ mV/m
10	$h = 70$ km (jour) $h = 90$ km (nuit) $d = 1911$ km (1 bond)	4	retard	$= 67-47$ $= 20$ µs $= 1{,}6$ cycle (c'est-à-dire 576°) à 80 kHz

RAPPORT 895-1 *

PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 30 kHz ENVIRON

(Programme d'études 31D/6)

(1982-1986)

1. Introduction

Du fait de la stabilité (en amplitude et en phase) de leur propagation, les ondes myriamétriques (3-30 kHz) sont utilisées pour les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires [Blair et autres, 1967] et pour de nombreuses et diverses applications aux communications et à la navigation [Casselman et autres, 1959]. On a constaté, en particulier, que la stabilité de la transmission permet une comparaison de fréquences avec une précision de quelque 10^{-12}, soit 10^4 fois meilleure que celle réalisable en ondes décamétriques; il est ainsi possible de mettre en œuvre un système de radionavigation à grande portée utilisant la comparaison de phase entre des émissions espacées, commandées en fréquence par des étalons atomiques ou à verrouillage de phase. Pour la navigation et le relèvement, le système de navigation OMEGA permet une précision de 1 à 3 milles marins [Beukers, 1974]. On est parvenu à des précisions 10 fois meilleures [Nard, 1972; Beukers, 1973] en utilisant une technique OMEGA différentielle, dans laquelle une station fixe sert de référence et permet d'apporter, pour une station mobile proche, les corrections nécessaires pour tenir compte de la variation diurne et des variations dues à des perturbations.

La bande des ondes extrêmement longues (30-3000 Hz) présente des inconvénients très graves par rapport aux bandes traditionnellement utilisées pour les radiocommunications. Sa largeur limitée à employer des débits binaires extrêmement faibles et, en raison de la longueur d'onde très grande, toute antenne d'émission que l'on pourrait construire serait inefficace du point de vue de la puissance rayonnée [Burrows, 1978]. Toutefois, pour certaines applications, dans lesquelles une partie du trajet de propagation se fait dans des milieux entraînant un affaiblissement comme les rochers, la terre, le sol et l'eau, cette bande offre une possibilité de communication là où les bandes classiques n'en offrent aucune. Même pour les ondes myriamétriques (3-30 kHz) où l'ordre de grandeur de la longueur d'onde est de une à deux fois plus faible, les seules antennes d'émission efficaces sont d'énormes structures coûteuses et il faut prévoir une puissance d'émission très élevée si l'on veut établir des communications dans le monde entier surtout avec des points sous-marins et souterrains.

Les émissions dans la bande des ondes extrêmement longues sont utiles pour les communications mondiales et les communications vers des destinations sous-marines ou souterraines [Burrows et Niessen, 1972; Willim, 1974]. Etant donné les problèmes techniques que pose, dans ces bandes, l'émission d'une puissance assez élevée pour être détectée à des milliers de kilomètres de distance, les rares données obtenues ne l'ont été que très récemment. Kuhnle et Smith [1964] ont mesuré l'affaiblissement d'un signal à ondes entretenues à 400 Hz; Davis [1976] et Bannister [1979] ont eux aussi mesuré des affaiblissements ainsi que la phase relative pour des signaux transmis dans la bande 2 et, plus précisément dans les bandes 40 à 50 Hz et 70 à 80 Hz. Depuis 1966, on observe des bruits atmosphériques dans les bandes des très basses fréquences [Taylor et Sao, 1970; Hughes et Theissen, 1970; Hughes, 1971; Chapman et autres, 1966]. Il est difficile de faire une description quantitative détaillée des données relatives aux émissions à ces fréquences très basses parce que, d'une part le nombre d'onde complexe dépend de la structure de l'ionosphère inférieure qui n'est uniforme ni en position, ni dans le temps, ni en direction, et d'autre part parce que les mesures deropagation dépendent de phénomèmes naturels (éclairs) comme sources de signaux. Une expérience a été faite en vue d'évaluer la moyenne des paramètres de propagation des ondes dans les bandes de très basses fréquences sur un trajet dans lequel l'environnement ionosphérique variait sur une distance d'une longueur d'onde [Hughes et Gallenberger, 1974].

On a élaboré plusieurs méthodes (avec les programmes d'ordinateur correspondants) pour calculer les niveaux des signaux dans la bande des ondes extrêmement longues. Ce sont notamment les méthodes décrites par Johler et Lewis [1969], Lewis et Johler [1976] et Pappert et Moler [1974]. Barr [1971a et 1971b] a fourni des résultats numériques particulièrement complets pour les caractéristiques de propagation dans la bande de fréquences de 1 à 10 kHz. Un résumé copieux de la théorie des radiocommunications sur les ondes extrêmement longues et de la mesure de celles-ci se trouve dans les articles de Galejs [1972] et de Wait [1974, 1977].

---

* Ce Rapport est porté à l'attention des Commissions d'études 7 et 8.

La «théorie des modes», qui est très largement utilisée pour les ondes myriamétriqes et peut l'être efficacement pour les ondes kilométriques jusqu'à 60 kHz au moins, est une théorie complète des ondes qui tient compte de la diffraction et de la propagation des ondes de surface. On considère que les ondes se propagent entre la Terre et l'ionosphère selon les modes normaux, comme dans la propagation des hyperfréquences dans un guide d'ondes avec pertes [Alpert et autres, 1967; Budden, 1961; Galejs, 1967a; Galejs, 1967b, Pappert, 1968; Volland, 1966; Wait, 1962 et 1964]. Pour les fréquences supérieures à 30 kHz environ, le guide d'ondes a une hauteur égale à un grand nombre de longueurs d'onde, et pour les petites distances il faut considérer un grand nombre de modes de propagation; en revanche, pour les ondes myriamétriques et pour les distances supérieures à 1000 km, il suffit de considérer quelques modes seulement. La représentation physique de la théorie des modes guidés est moins facile que celle des bonds, mais il semble que cette théorie explique mieux que la théorie des bonds certaines caractéristiques de la propagation des ondes myriamétriques.

Les émetteurs d'ondes myriamétriques ou kilométriques couramment utilisés rayonnent un champ polarisé verticalement. En principe, l'ionosphère et le champ magnétique terrestre peuvent introduire une composante polarisée horizontalement, mais on ne possède pas de preuves expérimentales montrant que ces champs sont importants à grande distance. Toutefois, des calculs théoriques [Snyder et Pappert, 1969; Foley et autres, 1973] conduisent à penser que, de nuit et aux basses latitudes, il peut y avoir une importante polarisation horizontale.

L'excitation par un doublet électrique horizontal d'un champ vertical E au sol, pour un rayonnement de 19,8 kHz, sous une ionosphère fictive pendant le jour et sous une ionosphère fortement anisotrope a été analysée numériquement en fonction de la conductivité du sol et de la hauteur de la source [Pappert, 1970]. Les résultats obtenus montrent que, pour une hauteur de la source du même ordre de grandeur qu'une longueur d'onde ou supérieure à celle-ci, les valeurs du champ créé par des doublets électriques, les uns horizontaux et les autres verticaux, peuvent devenir comparables. De même, quand une extrémité ou les deux extrémités d'un trajet de propagation se trouvent à une assez grande hauteur, on peut obtenir un gain de l'amplitude du signal en utilisant, pour les antennes d'émission et de réception, des orientations autres que la verticale [Pappert et Bickel, 1970]. Cette propriété prend une importance particulière pour les radiocommunications air-air sur ondes myriamétriques et kilométriques.

2. Calcul du champ par la méthode des modes guidés: premières approches

2.1 *Calcul du champ dans un guide sphérique et homogène*

Le champ rayonné, E, par un émetteur à une distance d km, au sol, peut être exprimé en mV/m de la manière suivante [Wait, 1962]:

$$E = \frac{300\sqrt{p}}{\sqrt{a \sin d/a}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{h} e^{-i\,(kd+\pi/4)} \sum_n \Lambda_n e^{-ikS_n d} \qquad \text{mV/m} \tag{1}$$

où

p : est la puissance rayonnée (kW),

a : est le rayon terrestre en km,

λ : est la longueur de l'onde en espace libre (km),

k : est égal à $2\pi/\lambda$,

Λ_n : est le facteur d'excitation pour le mode n,

kS_n : est la constante de propagation,

d : est la distance au sol (km),

h : est la hauteur de l'ionosphère (70 km le jour; 90 km la nuit).

Les termes Λ_n et S_n sont en général des grandeurs complexes. Le facteur d'excitation Λ_n donne l'amplitude et la phase relatives de chaque mode d'ordre n qui est excité par la source dans le guide d'ondes formé par la Terre et l'ionosphère. La partie réelle de la constante de propagation kS_n contient l'information de phase pour chaque mode, tandis que la partie imaginaire détermine le taux d'affaiblissement. Pour obtenir le champ, il faut faire la sommation des contributions de chaque mode, en tenant bien compte de la phase relative de chaque terme. Il faut procéder à une correction près des antipodes, lorsque $d/a \approx \pi$.

Le champ pour le mode n a pour expression, en mV/m:

$$E_n = \frac{300\sqrt{p}}{\sqrt{a \sin d/a}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{h} \mid \Lambda_n \mid e^{-\alpha_n d} e^{i(\Phi_n - kd \operatorname{Re} S_n)} \quad \text{mV/m} \tag{2}$$

où

Λ_n (facteur d'excitation) $= \mid \Lambda_n \mid e^{i\Phi_n}$

α_n (facteur d'affaiblissement) $= \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{Im} S_n$

$= -8{,}68 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \operatorname{Im} S_n$ dB/km

$\operatorname{Im} S_n$ et $\operatorname{Re} S_n$ désignent respectivement les parties imaginaire et réelle de S_n. La vitesse de phase $V_n = c/\operatorname{Re} S_n$, c étant la vitesse en espace libre.

Dans la plupart des cas, il est commode de tracer des courbes du champ en fonction de la distance [Watt, 1967]. La méthode recommandée consiste à commencer avec les valeurs convenables de Λ_n et de S_n et de procéder aux calculs indiqués par la formule (1). Lorsqu'il y a coexistence de plusieurs modes de propagation, il faut exprimer la formule (1) en amplitude et en phase. Dans certains cas (par exemple, pour la propagation d'ondes myriamétriques pendant le jour à partir d'un émetteur installé au sol), il suffit de considérer trois modes; en revanche, des modes plus nombreux sont nécessaires pour une propagation de nuit aux fréquences les plus élevées de la bande des ondes myriamétriques [Snyder et Pappert, 1969; Bickel et autres, 1970; Pappert et Bickel, 1970].

Le champ dû à chaque mode n dépend de Λ_n et de S_n. Ces facteurs dépendent eux-mêmes de la longueur d'onde, de la hauteur de l'ionosphère, des propriétés électriques du sol et du coefficient de réflexion sphérique de l'ionosphère. Les coefficients de réflexion ionosphérique dépendent des facteurs suivants: répartition verticale de la densité électronique et de la fréquence de collision, direction et amplitude du champ magnétique terrestre, fréquence et angle d'incidence. La répartition de la densité électronique est une fonction des paramètres suivants: latitude, saison, cycle d'activité solaire, heure du jour, présence ou absence de perturbations ionosphériques.

On peut résumer de la façon suivante l'influence exercée par ces divers paramètres [Al'pert et autres, 1967; Budden, 1961; Volland, 1966; Wait, 1964]:

- *Conductivité du sol:* en règle générale, une diminution de la conductivité du sol entraîne une augmentation du taux d'affaiblissement pour tous les modes. Certains calculs montrent cependant [Wait et Spies, 1965] que, pour une conductivité très faible (par exemple, dans les régions des calottes polaires couvertes de glace), le taux d'affaiblissement peut s'approcher d'un maximum, pour décroître ensuite lorsque la conductivité continue à diminuer. Pour des valeurs moyennes de la conductivité, le module du facteur d'excitation pour le mode du premier ordre augmente généralement quelque peu lorsqu'on fait décroître la conductivité. De plus, une diminution de la conductivité s'accompagne également d'une diminution de la vitesse de phase de chaque mode.

- *Direction de la propagation par rapport au champ magnétique terrestre:* les paramètres des modes de propagation des ondes myriamétriques ne varient guère pendant le jour, quelles que soient la latitude ou la direction de la propagation. Pendant la nuit, ces paramètres varient légèrement en fonction de la latitude lorsqu'il s'agit de la propagation vers l'est magnétique. En ce qui concerne la propagation vers l'ouest magnétique, tous les paramètres sont sujets à de fortes variations dans la direction nord-sud quand on s'approche de l'équateur magnétique. En particulier, l'affaiblissement est plus important dans la propagation vers l'ouest que dans la propagation vers l'est. L'amplitude et la forme exactes de la variation azimutale des paramètres de propagation des ondes myriamétriques à l'équateur magnétique restent encore à déterminer.

  On a observé des anomalies sur les trajets transéquatoriaux dans la direction de l'ouest [Crombie, 1966; Lynn, 1967, 1969, 1975; Kaiser, 1969; Chilton et autres, 1969; Meara, 1973; Reder, 1979]; ces observations conduisent à penser que les variations les plus marquées se produisent dans une ceinture large de quelque 15° de part et d'autre de l'équateur magnétique. Aux fréquences utilisées par le système de radionavigation Oméga, le déphasage diurne sur le trajet transéquatorial d'est en ouest est de 35% inférieur à la valeur moyenne à des latitudes moyennes [Lynn, 1975; Kikuchi, 1983]. Un brouillage anormal causé par un signal propagé par l'arc majeur se produit autour de l'équateur géomagnétique, ce qui montre une asymétrie importante d'est en ouest dans l'affaiblissement de la propagation [Kikuchi et Ohtani, 1984]. Des calculs théoriques [Gallenberger et Swanson, 1971] montrent une importante variation des paramètres des modes de propagation dans la direction de l'ouest, à mesure que l'on s'approche de l'équateur magnétique. L'effet de la fréquence sur ces variations reste à déterminer.

– *Emploi du paramètre de conductivité:* on a montré [Wait et Spies, 1965] que l'on peut faire des calculs utiles de la propagation guidée en supposant que la variation en hauteur d'un paramètre de conductivité $\omega_r(z)$ est donnée par la formule:

$$\omega_r(z) = \omega_r(h) \exp [\beta (z - h)] \tag{3}$$

où $\omega_r = \omega_0^2/\nu$ pour $\nu \gg \omega$; ω, ν et ω_0 désignent respectivement la pulsation de l'onde, la fréquence de collision et la fréquence angulaire du plasma; z est la hauteur, h une hauteur de référence pour laquelle on a $\omega_r \simeq 2{,}5 \times 10^5\ s^{-1}$. Le terme β donne le gradient vertical de ω_r. Durant les heures de jour, h est de l'ordre de 70 km et $\beta \approx 0{,}3$, les valeurs correspondantes pour la nuit étant 90 km et $\beta \approx 0{,}5$. Ces deux paramètres, h et β, fournissent un moyen commode, mais approximatif, de décrire le modèle d'ionosphère à utiliser dans les calculs en ondes myriamétriques.

Morfitt [1977] ainsi que Davis et Berry [1977] donnent un grand nombre de valeurs spécifiques des caractéristiques β et h nécessaires pour simuler les champs créés par des ondes myriamétriques et des ondes kilométriques de jour et de nuit.

2.2 *Calcul du champ dans un guide inhomogène*

Les calculs ci-dessus concernent des cas où les caractéristiques du trajet sont indépendantes de la distance. Supposons que la répartition de la densité électronique en fonction de la hauteur soit constante le long du trajet mais que la conductivité du sol ou l'angle du champ magnétique soit variable; dans ces conditions, on a le droit, sans introduire des erreurs importantes, d'utiliser dans le calcul des valeurs moyennes du taux d'affaiblissement et de la vitesse de phase. Soit par exemple α_{nm} et $c/\mathrm{Re}S_{nm}$ le taux d'affaiblissement et la vitesse de phase sur une longueur d_m du trajet, on a alors:

$$\alpha_d = \sum_m \alpha_{nm}\, d_m \tag{4}$$

$$\mathrm{Re}S_n\, d = \sum_m \mathrm{Re}S_{nm}\, d_m \tag{5}$$

Cette méthode manque de précision si la hauteur de référence de l'ionosphère n'est pas la même à l'emplacement de l'émetteur et à celui du récepteur (au voisinage du lever du Soleil ou du crépuscule). En pareil cas, il faut encore remplacer dans la formule (1) Λ_n et h respectivement par $\sqrt{\Lambda_{nT}\,\Lambda_{nR}}$ et $\sqrt{h_T\,h_R}$, les indices T et R se rapportant à l'émetteur et au récepteur [Wait, 1964; Watt, 1967].

L'amplitude et la phase d'un mode unique varient d'une façon régulière en fonction de la distance, sans oscillations. Lorsqu'il y a coexistence de plusieurs modes qui ont des vitesses de phase différentes, le champ subit des variations oscillatoires, à mesure que les divers modes se mettent en concordance et en opposition de phase. En présence d'un seul mode, $\Phi = \Phi_n - kd\,\mathrm{Re}S_n$. Lorsqu'il y a coexistence de plusieurs modes, il y aurait intérêt à commencer les calculs du champ pour de petites distances et à calculer les nouvelles valeurs de Φ pour des distances de plus en plus grandes.

Une méthode approchée pour calculer les variations diurnes du champ lorsque les signaux sont transmis dans la direction est-ouest ou ouest-est et que certaines portions du trajet sont dans l'obscurité et d'autres éclairées, fournit des amplitudes et des phases du signal qui sont proportionnelles aux facteurs d'excitation diurnes et nocturnes combinés $\Lambda_{D,N}$, aux facteurs d'affaiblissement $\alpha_{D,N}$, et aux vitesses de phase $V_{D,N}$ (égales à $c/\mathrm{Re}S_{D,N}$), de la manière suivante:

$$E_n \approx \sqrt{\frac{|\Lambda_D| \cdot |\Lambda_N|}{h_D \cdot h_N}}\ e^{-(\alpha_D d_D + \alpha_N d_N)}\ e^{i}\left[\frac{\Phi_N + \Phi_D}{2} - k(S_N d_N + S_D d_D)\right] \tag{6}$$

Il semble que cette façon de procéder tienne compte des variations journalières que l'on observe sur les longs trajets (environ 10 000 km) aux fréquences inférieures à 18 kHz environ. Le retard de phase total est égal à la somme des retards de phase sur la partie éclairée et la partie obscure du trajet. A mesure que la ligne de démarcation (à savoir la ligne de lever ou coucher du Soleil) se déplace le long du trajet, la phase, dans ce modèle simple à un seul mode, varie proportionnellement à la longueur du trajet qui se trouve dans l'obscurité, ce qui donne la variation journalière trapézoïdale bien connue [Crombie et autres, 1958].

Cette méthode n'est plus applicable aux fréquences plus élevées ou aux trajets plus courts, car on constate alors que les variations diurnes de phase sont susceptibles de disparaître presque entièrement, ou même d'être inversées (retard de phase plus grand de jour que de nuit), ou que les variations au lever et au coucher du Soleil peuvent se produire dans le même sens [Burgess, 1970]. Toutefois, lorsqu'on introduit plusieurs modes dans la formule (1) et que l'on calcule le retard de phase avec des paramètres convenables pour les heures de jour et les heures de nuit, on obtient les phénomènes observés.

On observe un autre phénomène au lever ou au coucher du Soleil [Crombie, 1964; Lynn, 1967; Walker, 1965]. Au lieu de varier d'une façon continue, la phase varie en présentant une série de paliers qui sont accompagnés par des valeurs très faibles du champ. Ce phénomène s'observe sur toutes les fréquences des bandes myriamétriques et il n'est pas masqué par le comportement irrégulier décrit ci-dessus, aux fréquences plus basses et sur de longs trajets. Les sauts de phase résultent d'un transfert d'énergie d'un mode à un autre, sur la ligne de démarcation du lever ou du coucher du Soleil. Considérons, par exemple, la propagation dans le sens ouest-est au lever du Soleil. L'émetteur excite plusieurs modes, parmi lesquels le deuxième et le premier au moins donnent des amplitudes notables sur la ligne de démarcation. Toutefois, comme ces modes ont des vitesses de phase différentes, ils se trouvent alternativement en phase et en opposition de phase le long du trajet. La variation des paramètres de la conversion de mode en fonction de la fréquence a été expérimentalement déterminée par Lynn [1973].

La meilleure manière d'obtenir les valeurs des paramètres des modes de propagation consiste à porter dans la formule (1) les mesures du champ en fonction de la distance effectuées dans des conditions diurnes et nocturnes sur une grande variété de trajets [Wait, 1962; Watt, 1967; Bickel, 1967; Rhoads et Garner, 1967; Bickel et autres, 1970].

Des progrès considérables ont été accomplis dans l'établissement de modèles qui donnent une répartition plus correcte de l'énergie radioélectrique entre les modes de propagation à travers des régions où le milieu change rapidement [Wait, 1968a; 1968b; 1970; Wait et Spies, 1968]. On a besoin de ces méthodes de conversion de mode pour calculer les variations du champ diurnes quand les signaux sont transmis à travers la région du terminateur jour-nuit. Les méthodes de conversion de mode sont importantes aussi quand le milieu se modifie le long du trajet de propagation (par exemple, action anormale du Soleil sur l'ionosphère ou fortes variations de la conductivité du sol).

Un programme de conversion de mode a été mis au point qui tient pleinement compte de l'inhomogénéité verticale de l'ionosphère ainsi que de son anisotropie [Pappert et Snyder, 1972]. Afin d'illustrer l'utilisation potentielle du programme pour les ondes myriamétriques, l'amplitude au lever du Soleil a été représentée numériquement sur un modèle en tenant compte de quatre modes différents [Walker, 1965]. On a utilisé des profils exponentiels avec une hauteur de référence et une échelle de hauteur variables, pour simuler l'élément terminal. D'après les études du modèle, la meilleure concordance a été obtenue pour une épaisseur de 1000 km de cet élément. Bien que les modèles soient à plusieurs modes, le modèle de Crombie [1964] (dans lequel les deux premiers modes de propagation de nuit sont convertis dans le premier mode de propagation de jour) s'est révélé applicable au trajet étudié. Cela s'expliquait par la faible conversion du troisième et du quatrième mode de propagation de nuit au premier mode de propagation de jour. La capacité de représenter les composantes du champ sous la forme du développement d'un ensemble complet de modes du guide d'ondes [Pappert et Smith, 1972] est essentielle pour résoudre les problèmes de guides d'ondes dans lesquels intervient une inhomogénéité dans la direction de propagation. L'évaluation des coefficients d'un tel développement se fonde généralement sur l'orthogonalité des modes pour le guide donné et sur les modes d'un guide d'onde «adjoint» approprié.

Ce programme de conversion de mode fournit aussi des résultats concordants avec ceux qui avaient été obtenus expérimentalement au lever du jour au moyen d'un sondeur ionosphérique multifréquence pour ondes myriamétriques sur un trajet de propagation allant des îles Hawaii à la partie sud de la Californie [Pappert et Morfitt, 1975]. On a constaté que, contrairement à l'hypothèse faite par Crombie [Crombie, 1964], deux modes étaient dominants quand l'emplacement de réception était situé dans la partie diurne du trajet.

L'amplitude et l'emplacement du changement de la hauteur effective du «guide d'ondes» au cours des crépuscules (au lever et au coucher du Soleil) ont été étudiés par Pappert et Snyder [1972], ainsi que par Lynn [1973]. On a comparé les résultats d'observations avec les résultats de calculs détaillés des paramètres de phase et d'amplitude au lever du Soleil, paramètres associés à la conversion de mode [Rugg, 1967; Mahmoud et Beal, 1971; Rinnert, 1973; Suzuki et autres, 1973].

La distance d'interférence entre les modes (la distance sur laquelle la différence de phase entre deux modes de propagation change de 2π) est un paramètre théoriquement calculable et que l'on peut mesurer de façon très précise. Les résultats de déterminations expérimentales relatives aux deux modes les plus significatifs ont été communiqués en fonction de la fréquence pour le jour et pour la nuit [Steele et Crombie, 1967; Rawles et Burgess, 1967] et pour diverses latitudes [Lynn, 1967]. Les distances d'interférence entre les modes déterminent la position des minima du signal observés dans les aéronefs en vol, le rythme d'occurrence des minima de signal et des sauts de phase au lever et au coucher du Soleil, ainsi que les variations habituelles de la phase pendant le jour et des niveaux du signal du jour à la nuit en fonction de la distance [Kaiser, 1969] et en fonction de la fréquence [Araki,1973; Lynn, 1978].

Les ondes radioélectriques myriamétriques qui se propagent à travers le Groenland sont fortement affectées par la mauvaise conductivité de la calotte glaciaire, comme le montrent par exemple les données sur l'intensité du signal obtenues par Burgess à bord d'un aéronef survolant le Groenland [Morfitt, 1977]. Des données expérimentales montrent que, si la hauteur de réflexion sur l'ionosphère augmente, l'affaiblissement et la vitesse de phase augmentent l'un et l'autre plus qu'il n'est normal pour un trajet maritime [Crombie, 1967; Westerlund et autres, 1969]. Il résulte de considérations théoriques [Westerlund et Reder, 1973] que la glace affecte tous les modes (quasi-TM) importants. Comparés à la propagation sur un trajet maritime, le mode du premier ordre a une vitesse de phase supérieure au-dessus de la glace, tandis que les modes des deuxième et troisième ordres ont des vitesses inférieures. Les trois modes subissent un affaiblissement plus grand. Au brusque changement que subit la conductivité du sol sur la côte du Groenland, les effets d'une conversion de mode sont importants.

3. Calcul du champ par les modes de guides d'ondes: Solution pour le champ complet

Dans la propagation à grande distance des ondes radioélectriques extrêmement longues, myriamétriques et kilométriques, ces ondes sont confinées dans l'espace compris entre la Terre et l'ionosphère. Cet espace agit comme un guide d'ondes et on utilise le «concept de guides d'ondes» pour caractériser les champs propagés en fonction de la distance.

La méthode du «mode de guides d'ondes» permet d'obtenir la solution pour le champ complet concernant un guide d'ondes dont les caractéristiques sont les suivantes:

- distribution arbitraire de la densité des électrons et des ions et de la fréquence de collision en fonction de la hauteur et
- une limite inférieure constituée par une Terre homogène et uniforme caractérisée par une conductivité de surface et une constante diélectrique ajustables. Cette méthode tient compte également de la courbure de la Terre, de l'homogénéité de l'ionosphère et de l'anisotropie (résultant du champ magnétique terrestre).

On considère que l'énergie contenue dans le guide d'ondes est répartie entre une série de modes. Chaque mode représente un état résonnant, c'est-à-dire que, pour un jeu discret d'angles d'incidence des ondes sur l'ionosphère, il se produit une résonance et l'énergie se propage en s'éloignant de la source. Les angles complexes (θ) pour lesquels cette situation se produit sont appelés «angles propres» (ou «modes»). On peut les obtenir en utilisant les méthodes «du champ complet» décrites aux § 3.1 et au § 3.2 qui permettent de résoudre l'équation déterminante (équation modale):

$$F(\theta) = \left| R_d(\theta)\, \bar{R}_d(\theta) - 1 \right| = 0 \tag{7}$$

où

$$R_d(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{\parallel}R_{\parallel d}(\theta) & {}_{\perp}R_{\parallel d}(\theta) \\ {}_{\parallel}R_{\perp d}(\theta) & {}_{\perp}R_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \tag{8}$$

est la matrice du coefficient de réflexion ionosphérique complexe dans le sens ascendant jusqu'à l'ionosphère en partant de la hauteur (d) et où

$$\bar{R}_d(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel d}(\theta) & 0 \\ 0 & {}_{\perp}\bar{R}_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \tag{9}$$

est la matrice de réflexion complexe dans le sens descendant jusqu'au sol en partant de la hauteur (d).

La notation $_{\parallel}$ pour R et $\bar{R}$ désigne la polarisation verticale tandis que la notation $_{\perp}$ désigne la polarisation horizontale. Le premier indice de R se rapporte à la polarisation de l'onde incidente, tandis que le second s'applique à la polarisation de l'onde réfléchie.

Les termes des formules (8) et (9) sont les suivants:

- ${}_{\parallel}R_{\parallel}$: rapport entre le champ réfléchi dans le plan d'incidence et le champ incident dans le même plan;
- ${}_{\perp}R_{\perp}$: rapport entre le champ réfléchi perpendiculaire au plan d'incidence et le champ incident perpendiculaire au plan d'incidence;
- ${}_{\parallel}R_{\perp}$: rapport entre le champ réfléchi perpendiculaire au plan d'incidence et le champ incident dans le plan d'incidence;
- ${}_{\perp}R_{\parallel}$: rapport entre le champ réfléchi dans le plan d'incidence et le champ incident perpendiculaire au plan d'incidence.

On obtient la matrice de réflexion ionosphérique, R_d (formule (8)), à la hauteur d par l'intégration numérique des équations différentielles formulées par Budden [1955]. On intègre les équations différentielles par une méthode de Runge-Kutta, en partant d'une certaine hauteur au-dessus de laquelle on admet que la réflexion est négligeable. La condition initiale de l'intégration, c'est-à-dire la valeur initiale de R, est considérée comme étant la valeur de R correspondant à une ionosphère de contours nets, au-dessus des profils déterminés de densité des électrons et de fréquence de collision. La méthode qui permet d'obtenir cette solution initiale est décrite par Sheddy [1968]. On calcule le terme R_d comme indiqué par Pappert et autres [1967] en termes de solutions de l'équation de Stokes et de ses dérivées.

On résout l'équation modale (formule (7)) pour autant de modes (angles propres, θ) que l'on désire. A partir du jeu de valeurs θ_n ainsi obtenu, on peut calculer les paramètres de propagation suivants: taux d'affaiblissement, vitesse de phase, et amplitude et phase du facteur d'excitation [Pappert et autres, 1967]. On utilise ensuite ces paramètres dans une sommation modale pour calculer le champ total, l'amplitude et la phase, en un point éloigné.

On peut, dans de nombreux cas, considérer que le guide d'ondes Terre-ionosphère a des propriétés de propagation constantes le long du trajt de transmission. Les calculs de la sommation modale effectués dans ces cas sont désignés comme étant horizontalement homogènes. Cependant, pour la propagation à grande distance, il serait peu réaliste d'admettre que les paramètres du guide d'ondes demeurent constants sur toute la longueur du trajet. Par exemple, la direction et l'intensité du champ magnétique terrestre varient et il peut y avoir des discontinuités dans la paroi inférieure du guide d'ondes par suite de variations de la conductivité du sol liées aux diverses limites terre-mer et aux calottes de glace polaires. La conductivité ionosphérique varie également selon l'heure de la journée, la saison et la présence de la ligne de lever ou de coucher du Soleil le long du trajet de propagation.

Ces types de discontinuité sont ceux qui causent des variations discrètes dans le guide d'ondes. Il convient, dans ces cas, de prendre en considération les effets de la conversation des modes dans la discontinuité. La conversion des modes signifie qu'un mode unique qui se propage dans une région du guide d'ondes produit, dans l'autre partie de ce guide d'ondes deux ou plusieurs modes qui se propagent ensuite vers le récepteur.

3.1 *Matrice de réflexion ionosphérique R(θ)*

Une étape capitale dans la détermination des constantes de modes examinées au paragraphe précédent est l'évaluation de la matrice de réflexion R pour une ionosphère anisotrope verticalement inhomogène. Celle-ci est effectuée par une intégration numérique des équations différentielles formulées par Budden [1955].

Le système de coordonnées choisi est tel que la direction de z est considérée comme positive à l'entrée dans l'ionosphère. (x) positif est le sens de propagation et (y) est perpendiculaire au plan de propagation.

La géométrie est présentée sur la Fig. 1 où une onde plane arrive sur l'ionosphère par le bas, formant le vecteur d'onde $\vec{k}$ dans le plan x-z (plan d'incidence) sous un angle d'incidence θ_1 par rapport à la verticale (axe-z). Les autres variables identifiées sur cette figure sont Ω, angle du champ géomagnétique mesuré à partir de la verticale ($90° < \Omega \leqslant 180°$ pour l'hémisphère Nord), et ψ, azimut de propagation (à l'est du Nord magnétique). Le vecteur $\vec{B}$ est la densité de flux magnétique de la terre.

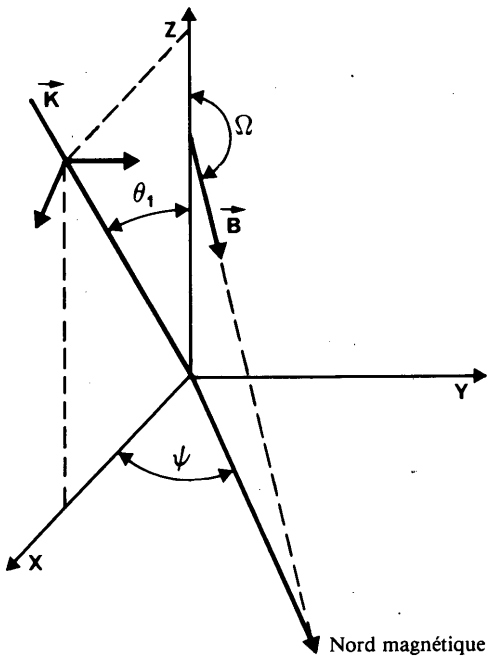


FIGURE 1 – *Géométrie de la propagation des ondes*

Les équations différentielles sont intégrées au moyen d'une technique de Runge-Kutta en commençant à une certaine hauteur, au-dessus de laquelle on suppose que la réflexion est négligeable. La valeur de départ de R est celle qui correspond à une ionosphère homogène nettement délimitée, caractérisée par des paramètres au sommet des profils donnés de densité électronique, de densité ionique et des fréquences de collision. La solution utilisée pour la valeur initiale de R est celle décrite par Sheddy [1968]. La protection contre les erreurs est assurée en comparant chaque palier d'augmentation des éléments de R calculés à l'aide d'une méthode de Runge-Kutta de quatrième ordre à ceux calculés à l'aide d'un stade d'intégration du deuxième ordre. L'intégration est effectuée en descendant à partir d'une hauteur initiale jusqu'à une hauteur d, d étant identifié par la formule (7). Il suffit que d soit choisi suffisamment bas dans l'ionosphère pour que les effets ionosphériques soient faibles par rapport aux effets de la courbure terrestre. Au-dessous du niveau d, le seul effet qui intervient est celui de la courbure terrestre, dont il est tenu compte en introduisant une permittivité modifiée qui varie linéairement en fonction de la hauteur.

3.2 *Matrice de réflexion au sol,* $\overline{R}_d(\theta)$

La matrice du coefficient de réflexion au sol $\overline{R}_d$, donnée par la formule (9), est déterminée en termes de solutions indépendantes h_1 et h_2 par rapport à l'équation de Stokes

$$\frac{d^2 h_{1,2}}{dz^2} + zh_{1,2} = 0 \tag{10}$$

où les fonctions h_1 et h_2 sont des fonctions de Hankel modifiées de l'ordre 1/3 (en relation linéaire avec les fonctions d'Airy), selon la définition du Computation Laboratory, Cambridge [1945]. Les expressions explicites de $_{\|}\overline{R}_{\|}$ et $_{\perp}\overline{R}_{\perp}$ sont indiquées par Pappert et autres [1967].

3.3 *Méthode de recherche des modes* («MODESRCH»)

La théorie du guide d'onde considère le champ comme composé d'une ou plusieurs famille distinctes (modes) d'ondes planes limitées au guide d'onde formé par la Terre et l'ionosphère. Le principal objectif est de trouver des solutions à la formule (7) pour les angles propres θ_n. Dans ce but, on utilise une méthode dite «MODESRCH» [Morfitt et Shellman, 1976].

La méthode «MODESRCH», mise au point essentiellement pour la propagation en ondes myriamétriques et dans la partie la plus basse de la bande des ondes kilométriques (de 10 kHz à environ 60 kHz) dans le guide d'onde formé par la Terre et l'ionosphère, trouve tous les modes dans n'importe quelle région rectangulaire physiquement importante de l'espace complexe de l'angle propre (θ_n). Cette méthode permet également de trouver le seul mode nécessaire pour la propagation des ondes extrêmement longues. La procédure est basée sur une théorie variable complexe. L'équation modale, formule (7), est résolue pour tous les angles propres θ_n importants, et pour l'ensemble donné de caractéristiques Terre-ionosphère ainsi que la fréquence de propagation. La recherche des angles propres est fondée sur le fait que les courbes de phase constantes pour une fonction complexe quelconque, $F(\theta)$ ne peuvent être discontinues qu'aux points où $F(\theta) = 0$ ou à ceux pour lesquels on a $F(\theta) \to \infty$. Pour simplifier le problème de la recherche des valeurs de θ_n, la fonction $F(\theta)$ est modifiée de sorte qu'elle ne contienne pas de pôles et qu'on ne considère que $F(\theta) = 0$. Une solution de $F(\theta) = 0$ peut être notée comme θ_0, c'est-à-dire que θ_0 est une fonction nulle de $F(\theta) = 0$.

Soit l'expression:

$$F(\theta) = F_R(\theta_r, \theta_i) + j\, F_I(\theta_r, \theta_i) = \mathrm{Re}\,(F) + j\,\mathrm{Im}\,(F) \tag{11}$$

où

$$\theta = \theta_r + j\theta_i \tag{12}$$

on a aussi

$$F(\theta) = [F_R(\theta_r, \theta_i)^2 + F_I(\theta_r, \theta_i)^2]^{1/2}\, e^{j\theta} \tag{13}$$

où

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}\left[\frac{F_I(\theta_r\theta_i)}{F_R(\theta_r\theta_i)}\right] \tag{14}$$

et

$F_R(\theta)$: la partie réelle de la fonction complexe $F(\theta)$,

$F_I(\theta)$: la partie imaginaire de la fonction complexe $F(\theta)$,

θ_r : la partie réelle de l'angle complexe (θ),

θ_i : la partie imaginaire de l'angle complexe (θ).

En partant de la formule (14), si l'on a

$\varphi = 0°$ (ou 180°), cela suppose que

$F_I(\theta_r, \theta_i) = 0$

En outre, si l'on a

$\varphi = 90°$ (ou 270°), cela suppose que

$F_R(\theta_r, \theta_i) = 0$

On obtient ainsi le diagramme de phase de la Fig. 2. Un ensemble de courbes de phase constante, appelées contours de phase, allant de 0 à 2π (en radians) est obtenu radialement (traits pleins) à partir d'un simple zéro. Les traits pointillés décrivent le comportement possible du contour de phase dans la région située au-delà du voisinage de θ_0, afin de souligner le fait que, dans cette région, les contours de phase ne sont habituellement pas radiaux. Etant donné le comportement de phase au voisinage d'une fonction nulle de $F(\theta)$, il est utile, du point de vue théorique, de définir une fonction nulle de $F(\theta)$ comme «source» d'un ensemble de contours de phase.

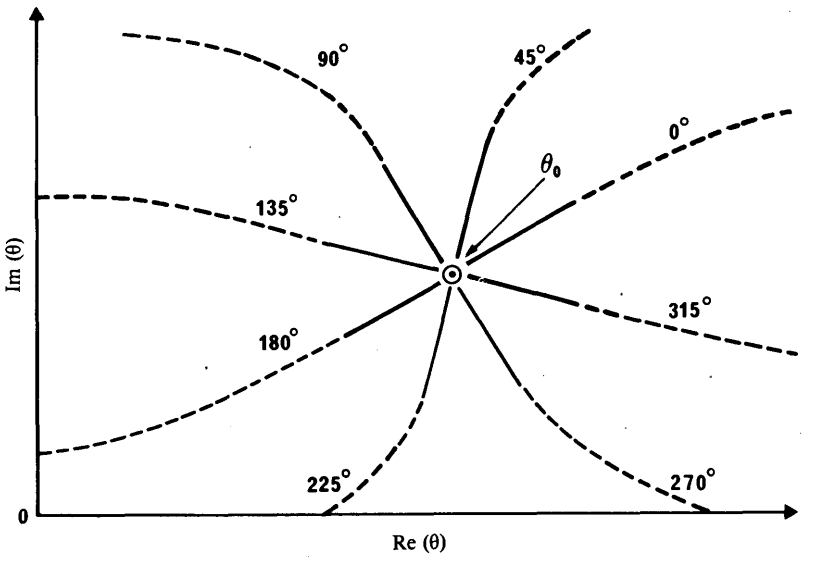


FIGURE 2 – *Allure du contour de phase au voisinage d'un zéro de F (θ)*

——— contour de phase au voisinage de θ_0

– – – – contour de phase au-delà du voisinage de θ_0

La Fig. 3 illustre quelques éléments fondamentaux de la méthode qui permet de trouver les zéros de la fonction $F(\theta)$. On place un rectangle de recherche dans une région quelconque du plan complexe. Le rectangle de recherche est divisé en une grille de carrés de maille dont les angles sont appelés «points de maille». Le choix de la dimension du carré de maille est libre et il se fait généralement en fonction de l'espacement prévu entre les zéros. Si $F(\theta)$ n'a pas de pôles, cela signifie que la ligne d'une valeur de phase constante quelconque $\varphi = \varphi_c$, qui rayonne à partir d'un zéro de $F(\theta)$, doit croiser un contour fermé contenant au moins une fois ce zéro. En outre, aucun autre zéro de $F(\theta)$ ne peut se trouver sur cette ligne de phase. De même, les lignes de phase constantes autour de $F(\theta) = 0$ ne progressent que dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Une ligne de phase constante (par exemple $\varphi = \varphi_c$) qui croise le contour peut être suivie vers l'intérieur jusqu'à ce qu'elle conduise à un zéro de $F(\theta)$ ou qu'elle atteigne à nouveau le contour. En commençant par l'angle supérieur gauche du rectangle de recherche, on effectue une recherche des limites pour les contours de phase à 0° et 180° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. N'importe quel contour de phase convient; cependant, on choisit les contours de phase à 0° et 180° car, présents lorsque Im $(F) = 0$, ils sont faciles à localiser mathématiquement. On effectue la recherche en évaluant $F(\theta)$ aux points de maille le long des limites du rectangle de recherche. Lorsque le signe de Im (F) change, cela indique qu'on vient de passer un contour de phase à 0° ou 180° (points A, D et G). Une fois localisé l'un quelconque de ces contours de phase, on interrompt temporairement la recherche des limites, tandis qu'on trace le contour de phase à 0° ou 180° à l'intérieur du rectangle de recherche par l'inspection de Im $F(\theta)$ aux angles des carrés de maille (inspection dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en commençant par l'angle supérieur gauche de chaque carré de maille). On suit le contour de phase jusqu'à ce qu'on découvre un zéro de $F(\theta)$ (points B et E) ou que l'on rencontre la limite du rectangle de recherche (comme cela se ferait pour le contour de phase compris entre G et H); l'une ou l'autre de ces situations apparaît toujours, à condition qu'il n'existe pas de pôles à l'intérieur du rectangle de recherche. Lorsqu'on localise un zéro, on réserve son emplacement. On trace alors, à partir du côté opposé au zéro, le contour de phase qui a subi un changement de phase de 180° (voir Fig. 2) jusqu'à ce qu'on rencontre à nouveau la limite du rectangle de recherche (points C et F). Lorsque le contour de phase est présent dans la limite de recherche comme aux points C, F ou H, on marque le carré de maille qui contient cet événement de manière à éviter ultérieurement de suivre à nouveau ce contour de phase particulier pendant la recherche de la limite. On interrompt également ce point (points C, F ou H) le tracé du contour de phase et on reprend la recherche de la limite au point où on a rencontré la dernière ligne de phase à 0° ou 180° (par exemple points A, D ou G). Lorsqu'on aura inspecté toute la limite du rectangle de recherche, on aura trouvé tous les zéros de la fonction $F(\theta)$ situés à l'intérieur du rectangle de recherche.

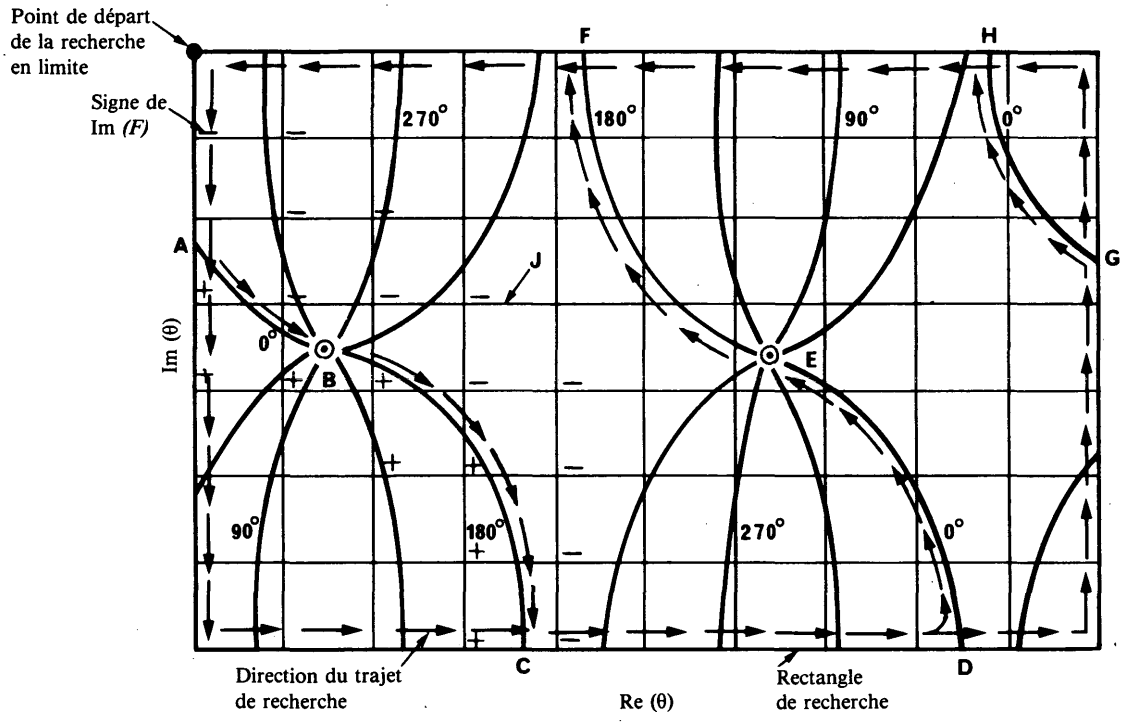


FIGURE 3 – *Méthode de recherche des modes de fonction F(θ)*

——— contours de phase pour $F(\theta)$
⊙ zéros de $F(\theta)$
J carré de maillage

L'emplacement d'un zéro est déterminé par l'intersection des contours de phase (voir la Fig. 2). L'intersection des contours de phase à 0° ou 180° avec un autre contour de phase quelconque permet donc de localiser un zéro de $F(\theta)$. L'autre contour de phase choisi à cet effet est le contour de phase de 90° ou 270°; il est choisi également par commodité, car il est facile de reconnaître ce contour qui apparaît lorsque Re $(F) = 0$. Lorsqu'on trace un contour de phase à 0° ou 180°, on examine également Re (F) dans les angles de chaque carré de maille pour localiser un changement de signe de Re (F) qui indique qu'un contour de phase à 90° ou 270° est entré dans le carré de maille. Cet événement indique qu'un zéro se trouve probablement dans ce carré de maille ou peut-être dans un carré de maille adjacent. Lorsqu'on sait qu'un carré de maille contient un zéro, on obtient une localisation plus précise du zéro par un schéma d'interpolation qui utilise à la fois la magnitude et la phase de la fonction $F(\theta)$. Ensuite, une itération de Newton-Raphson signale l'emplacement du zéro.

La méthode de Newton-Raphson consiste à utiliser chacune des solutions «d'angles propres» θ_n obtenues à partir de la grille «MODESRCH» comme solution initiale θ_0 de la formule (7) où $F(\theta) = 0$. On recalcule ensuite la fonction pour $\theta_0 + \delta\theta$ et on obtient la correction à θ_0 à partir de l'équation:

$$\Delta\theta = - \frac{F(\theta_0)\,\delta\theta}{F(\theta_0 + \delta\theta) - F(\theta_0)} \tag{15}$$

On calcule alors la correction déterminée par la formule (15) et on répète le processus jusqu'à ce que les valeurs $|\Delta\theta_r|$ et $|\Delta\theta_i|$ soient réduites conformément à la tolérance préassignée. Les indices r et i désignent respectivement la partie réelle et la partie imaginaire.

Il existe un programme d'ordinateur qui permet de calculer ces «angles propres» pour une ionosphère arbitraire et une Terre homogène [Morfitt et Shellman, 1976].

4. Calcul du champ

4.1 *Paramètres nécessaires*

Les angles propres θ_n étant connus, les valeurs suivantes présentant un intérêt physique sont faciles à calculer:

$$V = \frac{c}{K(\sin\theta_n)_r} = \text{vitesse de phase au sol} \tag{16}$$

$$\Gamma = -8{,}6859kK(\sin\theta_n)_i = \text{constante d'affaiblissement au sol (en dB/mégamètre)} \tag{17}$$

où

$$c = 2{,}997928 \times 10^5 \text{ km/s} = \text{vitesse de la lumière dans le vide}$$

$$K = \left(1 + \frac{\alpha h}{2}\right) \tag{18}$$

$$\alpha = 2/a = 3{,}14 \times 10^{-4}/\text{km} \tag{19}$$

Si l'on utilise la géométrie de la Fig. 1, le sens de stratification est le sens z et le sens de propagation est situé dans le plan x-z. On considère que le sens d'entrée de z dans l'ionosphère est positif. Le sens de propagation x est positif et y est perpendiculaire au plan de propagation. Ainsi, les champs ne présentent aucune dépendance vis-à-vis de y, mais présentent vis-à-vis de x une dépendance de la forme $\exp(-ik\sin\theta_x)$, où k est la magnitude du vecteur de propagation en espace libre et θ l'angle entre le sens du vecteur de propagation et le sens z en un point du milieu stratifié où l'indice de réfraction modifié est égal à l'unité. On admet que toutes les valeurs de champ varient en fonction de $\exp(i\omega t)$ où ω est la fréquence angulaire.

Le facteur modal d'excitation et les fonctions modales de gain de hauteur sont deux paramètres nécessaires pour le calcul des champs électriques. Les formules relatives au facteur d'excitation sont résumées dans le Tableau I. Les titres des colonnes ne s'appliquent qu'à l'excitation des composantes du champ électrique E_z, E_y et E_x et ceux des rangées s'appliquent à l'excitation par un dipôle vertical (λ_V) un dipôle horizontal de rayonnement longitudinal (λ_E) et un dipôle horizontal de rayonnement transversal (λ_B).

Les termes R et $\overline{R}$ représentent, respectivement, les éléments de la matrice de réflexion orientée vers l'ionosphère et vers le sol, à partir du même niveau d à l'intérieur du guide. Les valeurs B_1 et B_2 sont données par la formule:

$$B_1 = \frac{S^{5/2}}{\left.\frac{\alpha F}{\alpha\theta}\right|_{\theta-\theta_n}} \qquad B_2 = -\frac{B_1}{S} \tag{20}$$

où S est le sinus de l'angle propre et où le dénominateur est la dérivée de l'équation modale dans l'angle propre θ_n.

TABLEAU I — *Facteurs d'excitation*

Composante du champ	E_z	E_y	E_x
Excitateur			
λ_V	$B_1 \dfrac{(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})^2(1-{}_{\perp}\bar{R}_{\perp}\,{}_{\perp}R_{\perp})}{{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel}\,D_{11}}$	$\dfrac{-B_1}{S}\dfrac{{}_{\parallel}R_{\perp}(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})(1+{}_{\perp}\bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\dfrac{B_1}{S}\dfrac{(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})^2(1-{}_{\perp}\bar{R}_{\perp}\,{}_{\perp}R_{\perp})}{{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel}\,D_{11}}$
λ_E	$B_2 \dfrac{(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})^2(1-{}_{\perp}\bar{R}_{\perp}\,{}_{\perp}R_{\perp})}{{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel}\,D_{11}}$	$\dfrac{-B_2}{S}\dfrac{{}_{\parallel}R_{\perp}(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})(1+{}_{\perp}\bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\dfrac{B_2}{S}\dfrac{(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})^2(1-{}_{\perp}\bar{R}_{\perp}\,{}_{\perp}R_{\perp})}{{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel}\,D_{11}}$
λ_B	$B_2 \dfrac{{}_{\perp}R_{\parallel}(1+{}_{\perp}\bar{R}_{\perp})(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})}{D_{12}}$	$\dfrac{-B_2}{S}\dfrac{(1+{}_{\perp}\bar{R}_{\perp})^2(1-{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel}\,{}_{\parallel}R_{\parallel})}{{}_{\perp}\bar{R}_{\perp}\,D_{22}}$	$\dfrac{B_2}{S}\dfrac{{}_{\perp}R_{\parallel}(1+{}_{\perp}\bar{R}_{\perp})(1+{}_{\parallel}\bar{R}_{\parallel})}{D_{12}}$

Les facteurs d'excitation doivent être complétés par les définitions des gains de hauteur.

On peut effectuer les calculs de champ pour les excitateurs de dipôle électriques d'orientation arbitraire situés à une hauteur quelconque à l'intérieur du guide. Il est possible ainsi de traiter les problèmes de propagation des ondes myriamétriques/kilométriques air-air, sol-air ou air-sol dans lesquelles intervient un canal de guide d'ondes inhomogène dans le plan horizontal. La Fig. 4 montre l'orientation du dipôle par rapport à la géométrie de propagation dans laquelle l'axe z est toujours perpendiculaire à la surface courbe de la Terre. Les angles γ et φ mesurent l'orientation de l'émetteur par rapport au système de coordonnées x, y, z.

Selon la Fig. 4, $\gamma = 0°$ représente l'excitation d'un dipôle vertical, tandis que $\gamma = 90°$ indique l'excitation d'un dipôle horizontal. En outre, φ est l'angle entre la direction du dipôle horizontal et la direction de propagation. De manière explicite, $\varphi = 0$ représente le rayonnement longitudinal et $\varphi = 90°$ représente le rayonnement transversal.

4.2 *Sommations de mode WKB et homogène dans le plan horizontal*

Outre l'inhomogénéité verticale de l'ionosphère, il est possible que le guide présente une inhomogénéité horizontale. En particulier, la variabilité des constantes de propagation le long du grand cercle peut résulter de la variabilité horizontale de l'ionosphère, de la variabilité de la conductivité du sol et/ou de la permittivité du sol, ainsi que des variations du champ géomagnétique ou de l'orientation. Dans les cas où le guide d'ondes Terre-ionosphère ne peut pas être considéré comme horizontalement homogène le long du trajet de propagation, on utilise la sommation de mode de la forme WKB. Ce modèle est précis lorsque les variations des paramètres modaux sont suffisamment progressives le long du trajet.

Conformément aux facteurs d'excitation et aux gains de hauteur, les équations de sommation de mode WKB peuvent s'exprimer en fonction de la distance de propagation.

Si l'on peut considérer que le trajet de propagation est horizontalement homogène sur toute sa longueur, l'équation est beaucoup plus simple:

$$(\lambda_V^T = \lambda_V^R),\ (\lambda_B^T = \lambda_B^R) \text{ et } (\lambda_E^T = \lambda_E^R). \qquad \text{Aussi, } (\bar{S}_n^T = \bar{S}_n^R)$$

la formule peut être utilisée pour calculer les champs en propagation multimode d'ondes myriamétriques et kilométriques. Cette équation peut aussi être utilisée pour la bande d'ondes extrêmement longues, mais, compte tenu des indices d'affaiblissement réduits qui caractérisent la partie inférieure de cette bande, d'importants brouillages pourraient se produire entre les signaux des trajets long et court.

On dispose de programmes d'ordinateurs permettant de calculer ces champs pour les ondes myriamétriques/kilométriques [Pappert et Shockey, 1971] et pour les ondes extrêmement longues [Pappert et Shockey, 1972a et 1972b].

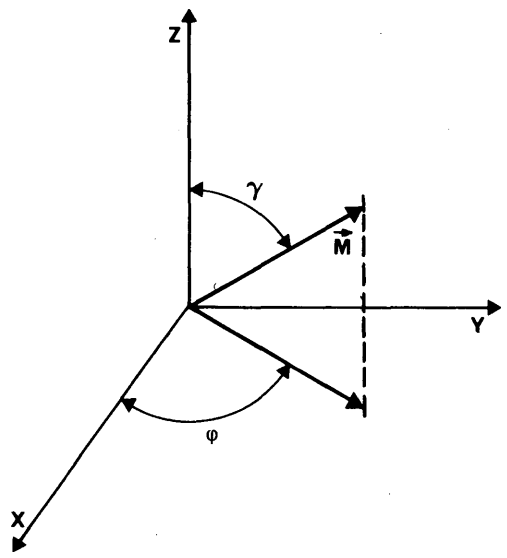


FIGURE 4 – *Orientation du dipôle $\vec{M}$ dans la guide d'ondes, γ étant l'inclinaison et φ l'orientation azimutale*

4.3 *Sommes de mode utilisant la conversion de mode*

Pour des conditions de propagation où l'on ne peut considérer que les propriétés des guides d'onde Terre-ionosphère variant lentement, on utilise des techniques de conversion de mode. Les exemples dans lesquels les procédures de conversion de mode sont nécessaires pour le calcul des champs sont applicables aux transmissions à travers la ligne de démarcation entre le jour et la nuit, ou lorsque, sur le trajet de propagation, se produisent de grandes modifications de la conductivité du sol, par exemple, lors du passage de la terre à la mer. Le modèle de conversion de mode permet un nombre et ordre de modes arbitraires de chaque côté du point de discontinuité du guide d'onde. Ce modèle permet aussi le calcul des composantes horizontales et verticales du champ électrique à une hauteur arbitraire du guide d'onde.

Le programme de conversion de mode est fondé sur le modèle à couches représenté dans la Fig. 5. On suppose l'absence de variation dans la direction y et l'on ne tient pas compte de la réflexion produite par la non-homogénéité horizontale. Si l'on admet ces hypothèses ainsi que celle d'une onde d'amplitude correspondant à l'unité dans le mode k qui est incidente par rapport à la région de l'émetteur (couche NTR), le coefficient de conversion de mode a_k^p pour la $p^{\text{ème}}$ couche associé à la conversion du mode k en mode j peut s'exprimer comme suit en fonction des coefficients correspondant à la $(p+1)^{\text{ème}}$ couche précédente:

$$\sum_{j=1}^{J} a_{ik}^{p} I_{n,j}^{p,p} = I_{n,k}^{p,p+1} \qquad p = NTR - 1$$

$$= \sum_{j=1}^{J} a_{jk}^{p+1} \left[-iks_j^{p+1} (x_p - x_{p+1}) \right] I_{n,k}^{p,p+1} \qquad 1 \leqslant p < NTR - 1 \tag{21}$$

où $i = (-1)^{1/2}$, k est le numéro de l'onde en espace libre, S_j le sinus de l'angle propre pour la couche p et J le nombre total de modes jugé important dans les déterminations du champ total.

Pour résoudre le système de la formule (21), il importe d'évaluer l'intégrale:

$$I_{jk}^{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} A_j^{mt} \cdot G_k^p \, dz \tag{22}$$

où t désigne l'adjoint et G^p la matrice de colonne à 4 éléments des gains de hauteur pour les composantes y et z des champs électriques et magnétiques du mode $k^{\text{ème}}$ dans la couche $p^{\text{ème}}$.

Le terme A_j^m est une matrice de colonne à 4 éléments des gains de hauteur pour un guide d'onde adjoint approprié [Pappert et Smith, 1972].

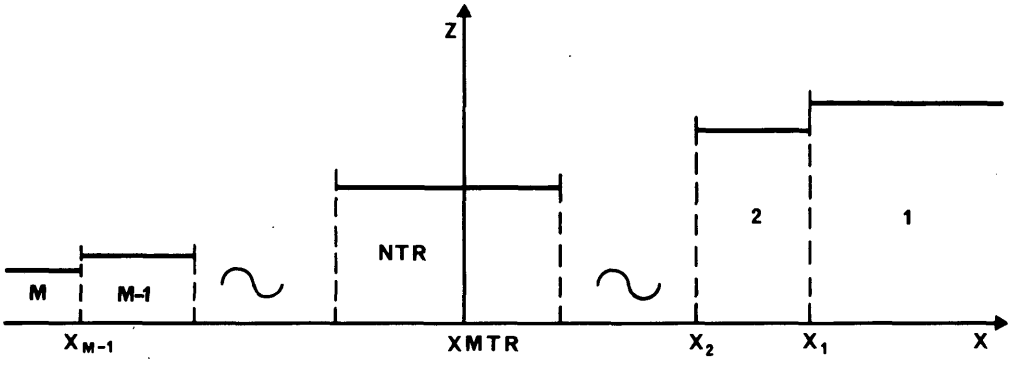


FIGURE 5 – *Modèle de conversion de mode*

Ici encore, comme dans le cas de la procédure de sommation du mode WKB, le calcul du champ peut être fait pour des excitateurs de doublet électrique d'orientation arbitraire situés à une hauteur quelconque dans le guide. Il est ainsi possible de traiter les problèmes de propagation air-air, sol-air ou air-sol aux ondes myriamétriques et kilométriques dans une voie de guide d'ondes horizontalement non homogène.

Deux options distinctes sont disponibles avec la procédure de conversion de mode. L'une concerne les calculs de champ (amplitude et phase) en fonction de la portée pour un emplacement fixe de l'inhomogénéité horizontale. La seconde permet les calculs de champ à un point de réception déterminé sur le trajet de l'arc de grand cercle en fonction de la position de l'inhomogénéité horizontale (cette option n'est utile que si la conductivité du sol et les paramètres géomagnétiques sont invariables sur le trajet). L'amplitude est exprimée en dB au-dessus d'un μV/m pour un radiateur de 1 kW, la phase étant indiquée en degrés par rapport à l'espace libre. Un programme d'ordinateur a été établi pour faire ces calculs de conversion de mode [Pappert et Shockey, 1976].

4.4 *Paramètres de l'ionosphère*

Les paramètres de l'ionosphère nécessaires pour calculer les valeurs du champ dans les bandes de 3 à 3000 Hz et dans les bandes d'ondes myriamétriques et kilométriques sont représentés par les courbes suivantes, qui sont fonction de la hauteur de l'ionosphère Z: courbe de la densité électronique, courbe de la densité des ions (positifs et négatifs), courbe de la fréquence des collisions entre particules (électrons-particules neutres) et courbe de la fréquence des collisions entre ions (positifs et négatifs) et particules neutres.

La conductivité ionosphérique ω_r est un paramètre commode, basé sur les courbes susmentionnées et qui est fonction de la hauteur Z. Ce paramètre est donné par la formule

$$\omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{\nu(Z)} = \frac{q^2}{\varepsilon_0}\left[\frac{N_e(Z)}{m_e\,\nu_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+\,\nu_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_-\,\nu_-(Z)}\right] \tag{23}$$

dans laquelle

$\omega_P(Z)$: la fréquence du plasma,

q : la charge électronique,

ε_0 : la permittivité de l'espace libre,

ν_e : fréquence des collisions entre électrons et particules neutres (s^{-1}),

ν_+ : fréquence des collisions entre ions positifs et particules neutres (s^{-1}),

ν_- : fréquence des collisions entre ions négatifs et particules neutres (s^{-1}),

N_e : densité électronique (cm^{-3}),

N_+ : densité des ions positifs (cm^{-3}),

N_- : densité des ions négatifs (cm^{-3}),

m_e : masse de l'électron,

m_+ : masse des ions positifs,

m_- : masse des ions négatifs.

Dans la plupart des cas de propagation des ondes myriamétriques et kilométriques, il suffit de prendre en considération les courbes de la densité électronique et la courbe de la fréquence des collisions entre électrons et particules neutres. Dans ce cas, selon Wait et Spies [1965], le paramètre $\omega_r(Z)$ de la conductivité peut être considéré comme ayant une forme exponentielle:

$$\omega_r(Z) = \omega_0 \exp\left[\beta\,(Z - H')\right] \tag{24}$$

dans laquelle

β : un paramètre de gradient en unités inverses de hauteur

et

H' : une hauteur de référence.

Les paramètres de l'ionosphère nécessaires comme données d'entrée dans les programmes de calcul de la propagation multimode par ordinateur sont la courbe de la densité électronique et la courbe de la fréquence réelle des collisions entre électrons et particules neutres. On peut donner à ces termes des relations exponentielles avec la hauteur et les désigner par β, km^{-1} et H', km.

La valeur de la densité électronique $N(Z)$, en électrons par cm^3, est calculée en fonction de l'altitude Z en kilomètres au moyen de la formule:

$$N(Z) = \left\{1{,}43 \times 10^7 \times \exp\left(-0{,}15\,H'\right)\right\}\left\{\exp\left[(\beta - 0{,}15)\,(Z - H')\right]\right\} \quad \text{el/cm}^3 \tag{25}$$

Aux fins des calculs, la courbe de la fréquence des collisions est donnée par:

$$\nu(Z) = \nu_0 \exp\left(-\alpha Z\right) \tag{26}$$

dans laquelle

Z: altitude en km,

ν_0 : $1{,}82 \times 10^{11}$ collisions/s,

α : 0,15 km^{-1}.

Cette combinaison de la densité électronique et de la fréquence des collisions donne une courbe de la conductivité ionosphérique fournie par la formule:

$$\omega_r(Z) = 2{,}5 \times 10^5 \exp\left[\beta\,(Z - H')\right] \tag{27}$$

L'utilité de ce modèle ionosphérique simple découle de sa facilité d'application et de ce qu'il permet effectivement d'établir des modèles de données mesurées expérimentalement comme l'ont démontré Bickel et autres [1970], Morfitt [1977] et Ferguson [1980]. La détermination des valeurs des paramètres β et H' s'effectue en comparant des données mesurées et les résultats de calculs théoriques en ajustant les paramètres de ces derniers jusqu'au moment où l'on obtient une bonne concordance. La méthode de comparaison la plus directe est obtenue lorsque les données mesurées sont recueillies en un grand nombre de points sur un trajet de propagation par l'arc de grand cercle incluant l'émetteur. C'est à bord d'un aéronef que les données sont recueillies le plus facilement. Les données étudiées par Bickel et autres, Morfitt et Ferguson ont été rassemblées de cette manière.

En règle générale, les modèles ionosphériques déterminés au moyen de la procédure ci-dessus doivent être considérés comme représentant une ionosphère moyenne, la modélisation se fondant sur l'hypothèse d'une ionosphère statique pendant la durée de vol de l'aéronef. La procédure d'adaptation des données vise à découvrir un schéma calculé de l'amplitude en fonction de la distance concordant avec le schéma à grande échelle des données mesurées. Dans ces conditions, un grand nombre de faibles variations d'amplitude sont prises en compte dans une valeur moyenne. Il se pourrait que des courbes de forme plus complexe qu'une courbe exponentielle corresponde mieux dans certains cas aux données mais les trajets de propagation étudiés étant très longs, toute courbe conçue pour s'adapter le mieux possible aux données est en fait une courbe moyenne pour l'ensemble du trajet.

L'analyse des données mesurées disponibles suggère les tableaux suivants des paramètres ionosphériques pour les prévisions de la propagation des ondes myriamétriques et kilométriques [Morfitt, 1977] et [Ferguson, 1980].

La relation caractéristique en fonction de l'altitude est illustrée à la Fig. 6 pour un certain nombre de courbes exponentielles pour le jour et à la Fig. 7 pour la nuit.

En ce qui concerne la propagation des ondes de 3 à 3000 Hz, les courbes de la densité des électrons et des ions [Pappert et Moler, 1974] sont représentées à la Fig. 8.

On trouve également aux Tableaux IV et V des indications sur les courbes de collisions entre électrons et ions pour les ondes 3-3000 Hz.

TABLEAU II — *Courbes recommandées pour la propagation des ondes myriamétriques et kilométriques pendant la journée*

	Eté	Hiver
Latitudes élevées	$\beta = 0{,}3$, $H' = 72$	$\beta = 0{,}3$, $H' = 72$
Latitudes moyennes	$\beta = 0{,}5$, $H' = 70$	$\beta = 0{,}3$, $H' = 72$

TABLEAU III — *Courbes recommandées pour la propagation des ondes myriamétriques et kilométriques pendant la nuit*

Courbes d'hiver					
	Inclinaisons magnétiques (en degrés)	H' (km)		β (km^{-1})	
		F = 10-30 (kHz)	F = 30-60 (kHz)	F = 10-30 (kHz)	F = 30-60 (kHz)
Latitudes élevées	90 à 75	76	76	$0{,}035F - 0{,}025$	1,2
Région de transition	75 à 70	80	80	$0{,}035F - 0{,}025$	1,2
Latitudes moyennes	< 70	87	88	$0{,}0077F + 0{,}31$	$0{,}0077F + 0{,}31$
Courbes d'été					
Toutes latitudes		$H' = 87$		β (km^{-1}) = $0{,}0077F + 0{,}31$	

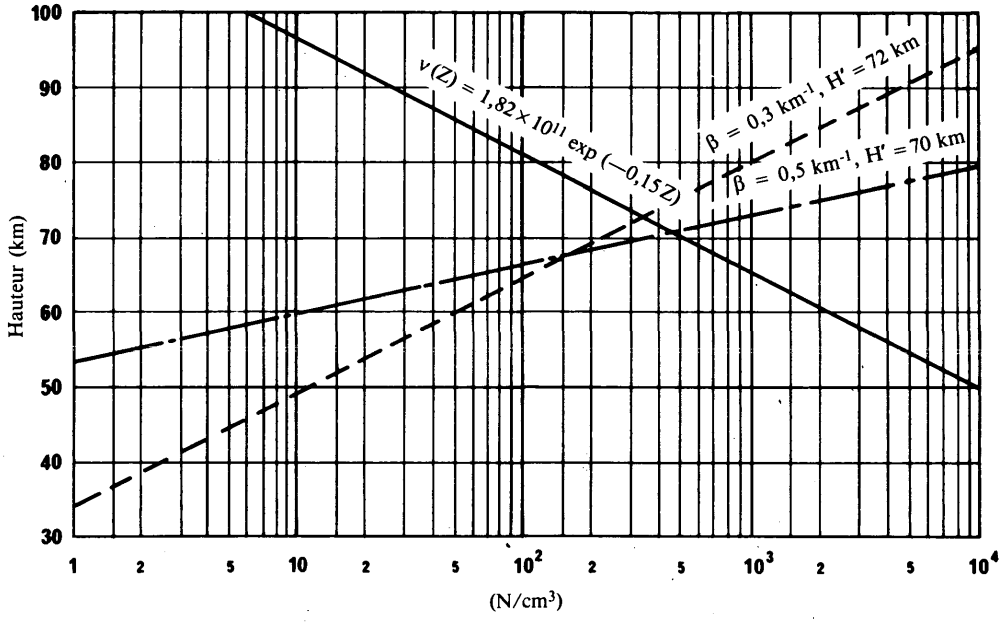


FIGURE 6 – *Courbes de la densité électronique et de la fréquence des collisions pendant le jour*

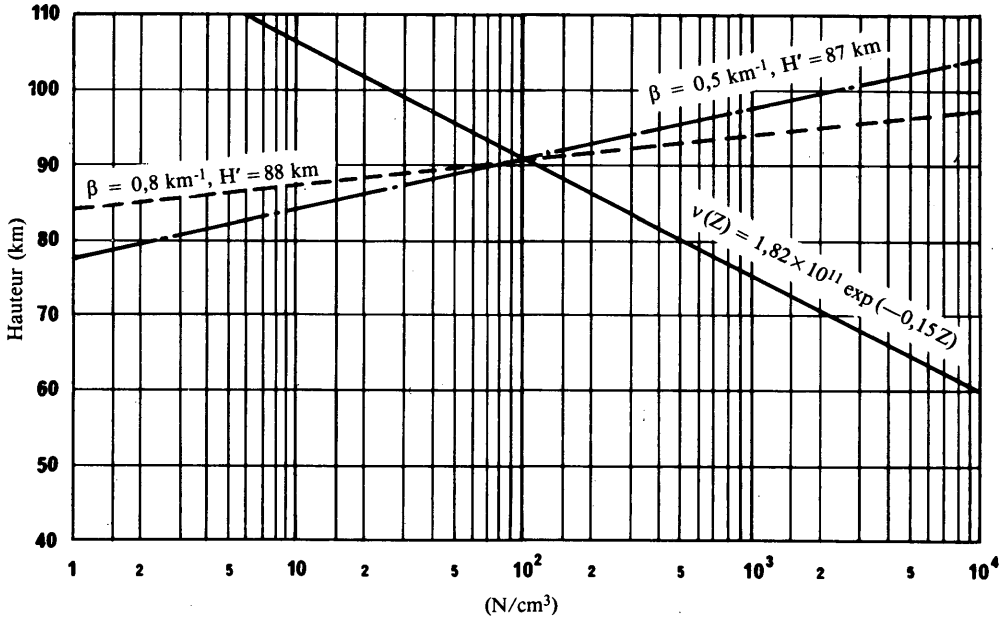


FIGURE 7 – *Courbes de la densité électronique et de la fréquence des collisions pendant la nuit*

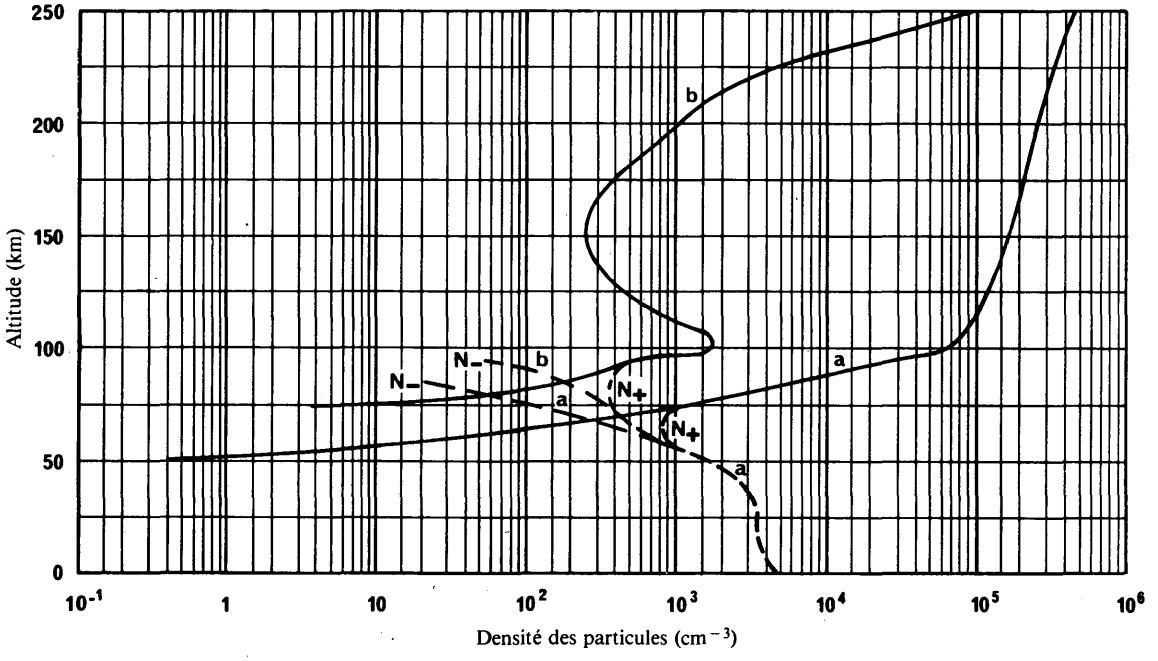


FIGURE 8 – *Courbes des constituants de l'ionosphère (jour et nuit)*

——— électrons

– – – – ions

a jour

b nuit

TABLEAU IV — *Fréquences des collisions observées pendant la journée entre électrons et ions dans l'ionosphère en secondes^{-1} en fonction de l'altitude*

Altitude (km)	Electrons	Ions positifs	Ions négatifs
260	$6{,}6 \cdot 10^2$	1,02	1,02
230	$5{,}3 \cdot 10^2$	2,00	2,00
210	$4{,}8 \cdot 10^2$	3,10	3,10
200	$5{,}0 \cdot 10^2$	4,00	4,00
180	$6{,}0 \cdot 10^2$	$1{,}30 \cdot 10^1$	$1{,}30 \cdot 10^1$
170	$8{,}0 \cdot 10^2$	$2{,}40 \cdot 10^1$	$2{,}40 \cdot 10^1$
150	$1{,}6 \cdot 10^3$	$9{,}00 \cdot 10^1$	$9{,}00 \cdot 10^1$
120	$1{,}0 \cdot 10^4$	$6{,}00 \cdot 10^2$	$6{,}00 \cdot 10^2$
100	$3{,}9 \cdot 10^4$	$1{,}60 \cdot 10^4$	$1{,}60 \cdot 10^4$
0	$4{,}3 \cdot 10^{11}$	$2{,}14 \cdot 10^{10}$	$2{,}14 \cdot 10^{10}$

TABLEAU V — *Fréquence des collisions observées pendant la nuit dans l'ionosphère entre électrons et ions en secondes^{-1} en fonction de l'altitude*

Altitude (km)	Electrons	Ions positifs	Ions négatifs
250	$1{,}05 \cdot 10^2$	$4{,}50 \cdot 10^1$	$4{,}50 \cdot 10^1$
225	$3{,}50 \cdot 10^1$	$9{,}00 \cdot 10^1$	$9{,}00 \cdot 10^1$
220	$3{,}00 \cdot 10^1$	1,00	1,00
210	$3{,}30 \cdot 10^1$	1,30	1,30
200	$4{,}50 \cdot 10^1$	2,00	2,00
150	$1{,}60 \cdot 10^3$	$4{,}50 \cdot 10^1$	$4{,}50 \cdot 10^1$
120	$1{,}00 \cdot 10^4$	$3{,}00 \cdot 10^2$	$3{,}00 \cdot 10^2$
100	$3{,}90 \cdot 10^4$	$8{,}00 \cdot 10^3$	$8{,}00 \cdot 10^3$
0	$4{,}30 \cdot 10^{11}$	$1{,}07 \cdot 10^{10}$	$1{,}07 \cdot 10^{10}$

4.5 *Paramètres géomagnétiques et géophysiques*

D'autres paramètres sont nécessaires pour calculer le niveau des signaux dans les bandes des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues: ce sont ceux qui décrivent l'orientation et l'intensité du champ magnétique terrestre le long du trajet de propagation ainsi que ceux qui donnent la valeur de la constante diélectrique complexe de la Terre en fonction de la fréquence utilisée pour la propagation.

Les paramètres qui décrivent le champ magnétique terrestre sont la grandeur du champ géomagnétique, l'azimut magnétique (en degrés est du nord) de la direction de propagation, et l'angle d'inclinaison mesuré par rapport à l'horizontale du vecteur du champ magnétique. Ces paramètres se modifient le long du trajet de propagation et ces variations sont incorposées dans le WKB ou dans les formules de conversion de mode.

La permittivité relative complexe de la Terre, N_g, est donnée par la formule:

$$N_g = \varepsilon/\varepsilon_0 - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \tag{28}$$

dans laquelle:

σ : conductivité du sol,

$\varepsilon/\varepsilon_0$: permittivité relative du sol,

ε_0 : permittivité de l'espace libre,

ω : fréquence angulaire de propagation.

Le Tableau VI donne les valeurs recommandées pour ces paramètres.

TABLEAU VI — *Conductivité et permittivité relative de la Terre*

	Conductivité σ (S/m)	Permittivité relative ε_r
Eau de mer	5	80
Terre	2×10^{-3}	15
Calotte glaciaire polaire	$2{,}5 \times 10^{-5}$	3

5. Résultats

Les Fig. 9, 10, 11 et 12 indiquent jusqu'à quel point les valeurs du champ calculées simulent les données de propagation mesurées. Elles indiquent le champ électrique vertical en fonction de la distance de propagation. Il a été tenu compte des courbes ionosphériques citées aux Tableaux II et III dans ces calculs du champ.

Les Fig. 9 et 10 comparent les champs calculés dans l'hypothèse d'une ionosphère homogène horizontale [Pappert et Shockey, 1976] et les données enregistrées par l'US Navy [Morfitt, 1977]. Ces dernières ont été enregistrées à bord d'aéronefs à diverses fréquences et concernent la propagation sur des trajets au-dessus de la mer aux latitudes moyennes, en été pendant la journée et en hiver pendant la nuit. Les résultats obtenus au moyen des courbes de jour avec $\beta = 0{,}5$ km^{-1} et $H' = 70$ km sont indiqués à la Fig. 9. Les résultats obtenus au moyen des courbes de nuit avec $\beta = 0{,}5$ km^{-1} et $H' = 87$ km sont indiqués à la Fig. 10.

Des mesures expérimentales à 45 et 60 kHz ont été faites à bord d'un aéronef survolant la calotte glaciaire du Groenland. Les émissions provenaient d'une station située en Angleterre et le trajet suivi par l'aéronef au-dessus de la calotte glaciaire du Groenland aboutissait à Sonderstrom, Groenland. La comparaison du champ mesuré et des prévisions obtenues par calcul est faite sur les Fig. 11 et 12. Pour établir ces figures, on a appliqué le programme de conversion de mode [Pappert et Shockey. 1976].

On a considéré par hypothèse que la conductivité du sol était de 5 S/m pour la partie du trajet au-dessus de la mer et de $2{,}5 \times 10^{-5}$ S/m au-dessus de la calotte glaciaire du Groenland. La courbe pour $\beta = 0{,}3$ km^{-1} et $H' = 72$ km a servi de base aux calculs de simulation des données mesurées.

6. Activité future

La théorie de la propagation des ondes radioélectriques (de 3-3000 Hz et ondes myriamétriques), nécessaire pour l'évaluation du champ, est maintenant relativement bien comprise. Deux théories concurrentes servent à décrire la propagation dans les bandes d'ondes myriamétriques: la théorie de la propagation par bond et la théorie du guide d'ondes.

Les solutions fournies par la première (voir le Rapport 265) sont généralement bien adaptées pour les courtes distances et les fréquences supérieures (ondes kilométriques) alors que celles correspondant à la seconde sont mieux adaptées aux grandes distances et aux fréquences plus basses (ondes myriamétriques). Des modes de calcul du champ plus précis nécessitent la prise en considération de modes électriques transversaux (TE) et magnétiques transversaux (TM) et la conversion entre ces types de modes. La prise en considération des deux types de polarisation est importante pour le calcul des champs horizontal et vertical entre émetteurs et récepteurs élevés.

Il semble que la théorie du guide d'ondes décrive mieux certaines caractéristiques de la propagation des ondes myriamétriques, par exemple, les échelons de phase observés à l'aube sur de longs trajets est-ouest, que ne le fait la théorie de la propagation par bonds. Le calcul du champ peut être plus simple avec la première de ces méthodes dans de nombreux cas. Il conviendrait de comparer de manière plus approfondie les résultats que l'on obtient avec l'une et l'autre de ces méthodes.

Il a été démontré que la concordance entre les calculs théoriques et les mesures est limitée. Mais il faut poursuivre les observations expérimentales, particulièrement à diverses fréquences entre 10 et 30 kHz au-dessus de la mer et de sols de conductivités diverses et à des latitudes représentatives. Il est probable que l'on dispose déjà d'un nombre suffisant de mesures de phase, mais ces données n'ont pas encore été examinées de façon systématique. Les observations doivent être suffisamment répétées pour en démontrer la stabilité. De telles mesures doivent permettre de déterminer les facteurs d'excitation, les taux d'affaiblissement et les vitesses de phase qui serviront de base aux calculs du champ et de la phase sur différents trajets. Cependant, il est plus important de comparer ces paramètres expérimentaux de la propagation avec la théorie et, si besoin est, d'améliorer la théorie ou d'en ajuster les paramètres de base. Il est vraisemblable que l'on observera plus de divergences de nuit que de jour.

Depuis quelques années, la propagation des ondes extrêmement longues et les possibilités de communication qu'elles offrent suscitent un regain d'intérêt: voir [IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1984]; AGARD [1982] et [CCIR, 1982-86]. On dispose en particulier de nouvelles informations (générales) sur la propagation des ondes extrêmement longues, sur le bruit des bandes correspondantes et sur la modélisation de l'ionosphère ambiante et de l'ionosphère perturbée. Des comparaisons ont été faites entre champ prévu et champ mesuré.

Il convient de noter que ces modèles d'ionosphère ambiante et d'ionosphère perturbée, qui semblent faire concorder les données prévues et disponibles concernant la propagation des ondes extrêmement longues, pourraient également permettre de prévoir les champs des ondes myriamétriques; ce type de prévision serait à la portée, à tout le moins, des administrations en mesure de procéder à de tels calculs.

Plusieurs programmes d'ordinateur ont été conçus pour calculer le champ des ondes myriamétriques sur la base de la théorie de la propagation guidée, par exemple par Hauser et Rhoads [1974], qui établissent les contours globaux de couverture pour les émetteurs fixes à ondes myriamétriques de l'US Navy sur la base d'un mode unique équivalent.

Il existe des programmes d'ordinateur fondés sur la théorie du guide d'onde tenant compte de l'ensemble des modes effectifs pour les ondes de 3-3000 Hz et les ondes myriamétriques et kilométriques. Ces programmes, dont la base a déjà été décrite [Pappert et Shockey, 1971, 1972a, 1972b, 1976] peuvent calculer les champs horizontaux et verticaux pour des hauteurs et des orientations d'antennes arbitraires dans un environnement isotrope non homogène. Un programme de recherche de mode rend la théorie de la propagation guidée précise et économique dans la partie basse de la bande des ondes kilométriques [Morfitt et Shellman, 1976].

Un plus grand nombre de mesures sont nécessaires pour établir les différences entre les latitudes moyennes, basses et élevées. L'effet d'écran de la calotte glaciaire du Groenland est net: les taux d'affaiblissement observés sont de 1,3 dB/1000 km de nuit et de 22 dB/1000 km de jour. Etant donné que les perturbations provoquées pendant le jour par les protons solaires abaissent encore la limite de la réflexion ionosphérique, il en résulte des taux d'affaiblissement nettement plus forts, à telle enseigne que la réception des signaux n'est plus possible. Les évaluations du champ concordent avec les résultats observés aux latitudes moyennes, dans la mesure où l'on tient compte de la médiocre conductivité du sol. Mais, aux latitudes élevées, on peut observer une dépendance marquée à l'égard des variations de la réflectivité ionosphérique dues à la saison et au cycle solaire.

Aux basses latitudes, il est actuellement impossible de calculer théoriquement les variations diurnes de phase et d'amplitude pour les trajets transéquatoriaux avec propagation vers l'ouest. Des études théoriques sont nécessaires pour réduire la variation de tous les paramètres pertinents des «guides d'ondes», y compris la conversion de mode. L'impossibilité de calculer les corrections applicables aux trajets transéquatoriaux lorsque la propagation a lieu vers l'ouest limite beaucoup l'efficacité du système de radionavigation OMEGA en ondes myriamétriques. A ce propos, il convient de définir expérimentalement la variation des paramètres en ondes myriamétriques en fonction de l'azimut, de la latitude et de la fréquence au voisinage de l'équateur magnétique.

Des recherches utilisant les atmosphériques comme sources naturelles d'ondes myriamétriques au-dessous de 10 kHz sont menées par divers groupes. Un méthode d'analyse statistique des atmosphériques a été mise au point dans cette gamme de fréquences par le Heinrich-Hertz Institut de Berlin [Volland et autres, 1970]: elle permet de localiser les orages et de déterminer la fonction de transmission des conduits ionosphériques en amplitude et en phase [Frisius et autres, 1970; Harth, 1971]. Malgré les connaissances très réduites que l'on a des caractéristiques de leur source, les atmosphériques aux ondes myriamétriques peuvent servir à établir des courbes de conductivité empiriques utiles pour les conditions de prévision de propagation à grande distance. Cette

méthode est particulièrement intéressante pour l'étude de trajets où des transmissions multifréquences ne sont pas autrement disponibles [Hughes et autres, 1974; Hughes et Pappert, 1975]. Aux Etats-Unis, des émissions multifréquences à impulsions à phases cohérentes ont été utilisées entre 9,4 et 31,25 kHz pour des études de propagation sur des trajets très courts et sur des trajets de longueur moyenne ainsi que sur un trajet de grande longueur entre Hawaï et la Californie [Morfitt, 1971 et 1973]. Des observations sur la réflectivité de l'ionosphère aux ondes myriamétriques sur un court trajet au voisinage de Thulé, au Groenland, ont été faites pendant plusieurs années [Pagliarulo et autres, 1979]. La technique appliquée pour ces expériences utilise des impulsions à ondes myriamétriques de 100 µs rayonnées par une antenne verticale de 130 m [Lewis et autres, 1973] pour déterminer les coefficients de réflexion ionosphériques de 6 à 35 kHz.

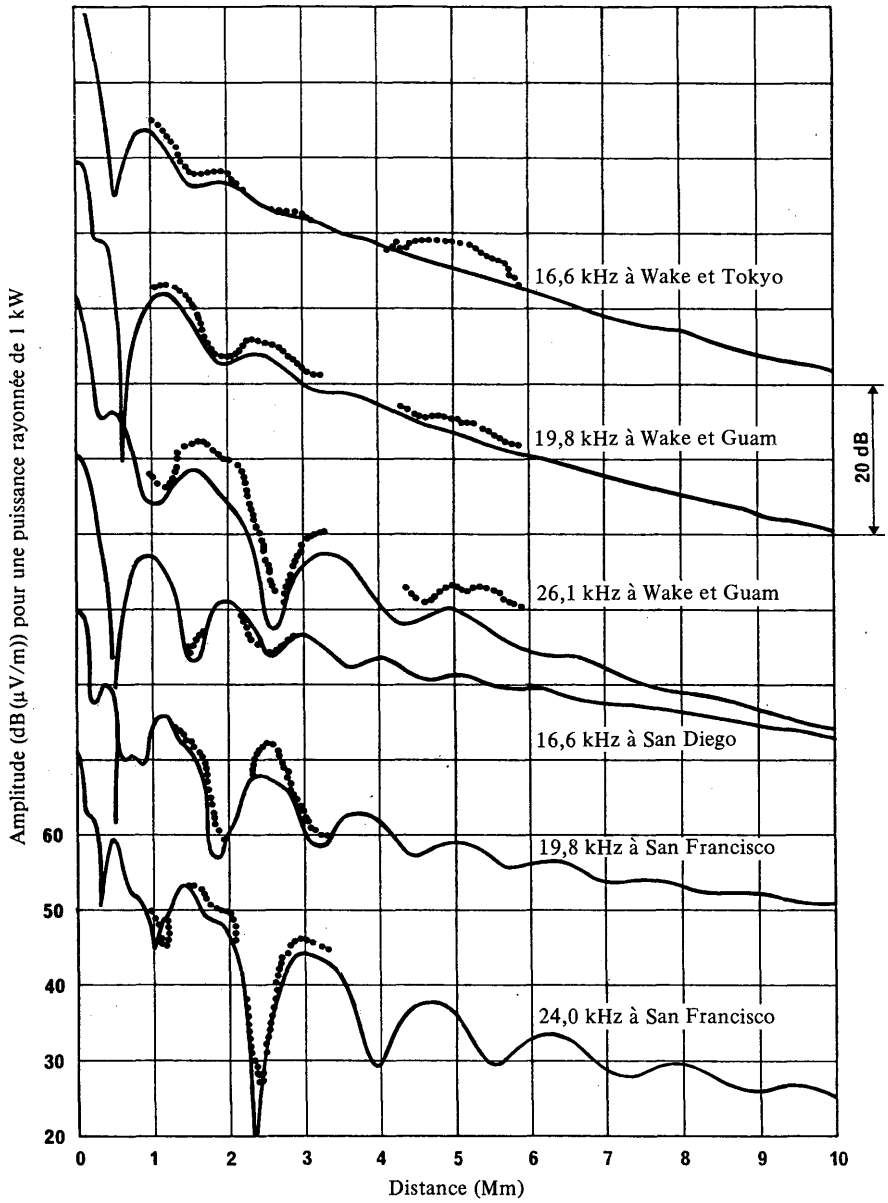


FIGURE 9 – *Propagation au-dessus de l'océan Pacifique de signaux émis à Hawaï (de jour en été)*

——— prévisions

••••••• observations

Note. – Les valeurs numériques portées en ordonnées concernent la première courbe (24,0 kHz); chacune des autres courbes est décalée de 20 dB par rapport à la précédente.

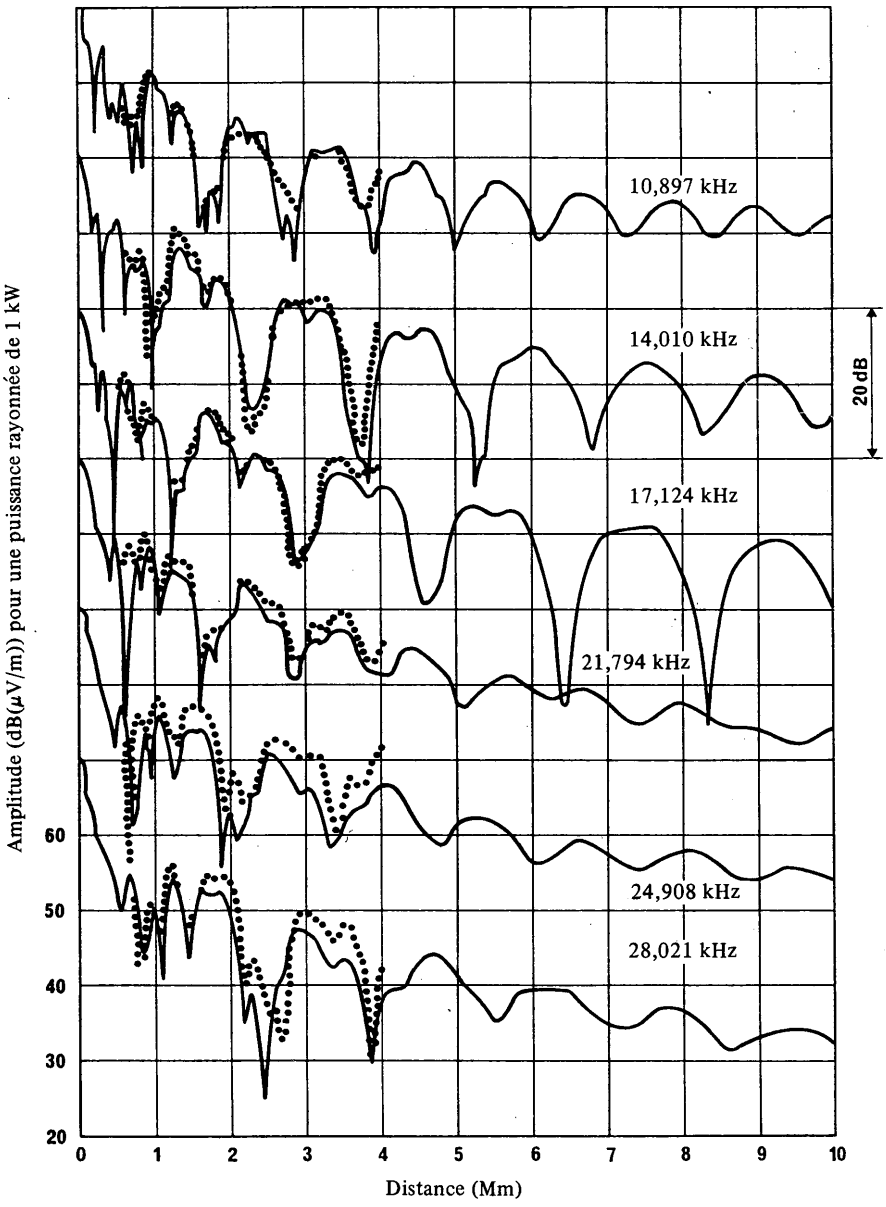


FIGURE 10 – *Propagation au-dessus de l'océan Pacifique jusqu'au sud de la Californie de signaux émis à Hawaï (de nuit en hiver)*

——— prévisions

••••••• observations

Note. – Les valeurs numériques portées en ordonnées concernent la première courbe (28,021); chacune des autres courbes est décalée de 20 dB par rapport à la précédente.

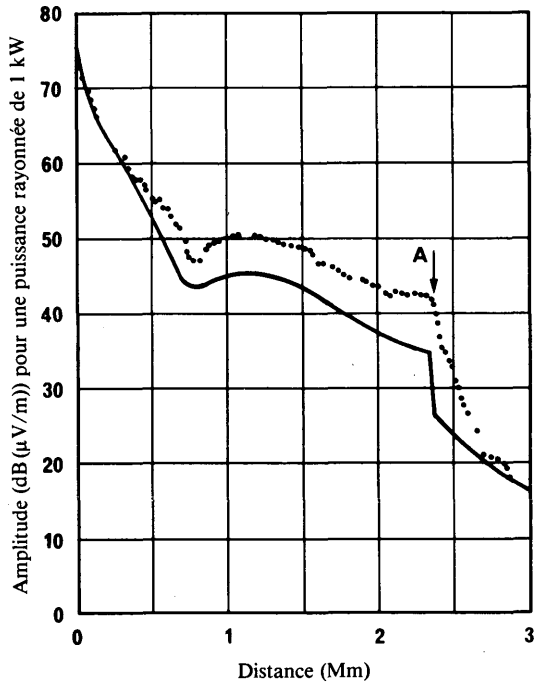


FIGURE 11 – *Propagation à haute latitude pendant la journée au-dessus de la calotte glaciaire du Groenland (45 kHz)*

——— prévisions

••••••• observations

A début de formation de la calotte glaciaire

De Preston (Royaume-Uni) à Sondrestrom (Groenland)
Fréquence: 45 kHz
$\beta = 0{,}3\ km^{-1}$, $H' = 72$ km

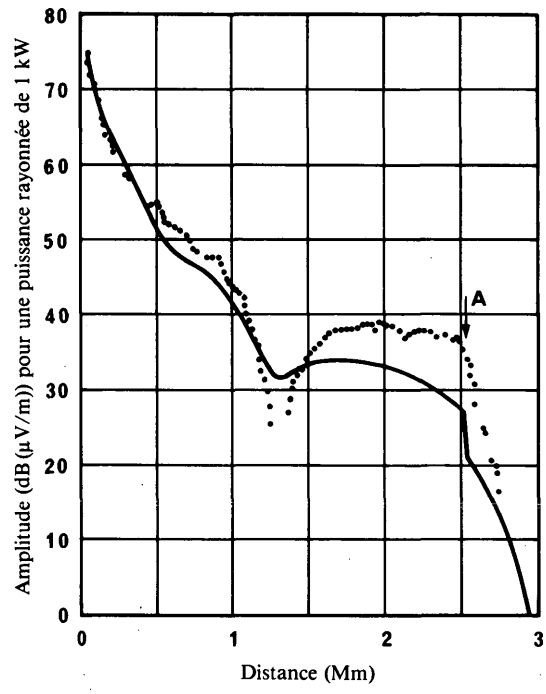


FIGURE 12 – *Propagation à haute latitude pendant la journée au-dessus de la calotte glaciaire du Groenland (60 kHz)*

——— prévisions

••••••• observations

A début de formation de la calotte glaciaire

De Rugby (Royaume-Uni) à Sondrestrom (Groenland)
Fréquence: 60 kHz
$\beta = 0{,}3\ km^{-1}$, $H' = 72$ km

Il serait souhaitable de faire ces mesures en utilisant un aéronef volant le long d'arcs de grands cercles entre les émetteurs et les stations de réception réelles. Il serait ainsi possible de déterminer la structure des modes aux récepteurs, en particulier de nuit sur des trajets pouvant atteindre de 5000 à 7000 km de long selon la fréquence utilisée. Les récepteurs fixes, qui contrôleraient en permanence les signaux, pourraient ainsi servir à déterminer les variations des paramètres de la propagation résultant des variations diurnes saisonnères et des changements causés par des différences d'activité solaire ainsi que des facteurs de conversion de modes.

L'autre solution, également souhaitable, consiste à utiliser des mesures faites par fusées ou au moyen de techniques de mesure à partir du sol pour établir les variations verticales de la densité électronique dans les couches basses de l'ionosphère. Les courbes qui en résulteraient pourraient ensuite servir à calculer les coefficients de réflexion de l'ionosphère. Ces coefficients serviraient ensuite à calculer les paramètres des modes de propagation des ondes myriamétriques pour pouvoir faire des comparaisons avec les résultats mesurés ou calculer directement les paramètres des modes. Des mesures de la densité électronique sont plus particulièrement nécessaires aux latitudes inférieures à 70 km où l'on note d'importantes divergences entre les observations dont on dispose actuellement pour la nuit et aux basses latitudes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGARD [1982] Ed. J. S. Belrose, *Medium, Long and Very Long Wave Propagation (at frequencies less than 3000 kHz).* Conf. Proc. No. 305. NASA Accession No. N82-27613. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

AL'PERT, Ya. L., GUSEVA, E. G. et FLIGEL, D. S. [1967] Propagation des ondes kilométriques par guide d'ondes électromagnétique. Académie des Sciences de l'URSS.

ARAKI, T. [1973] Anomalous diurnal changes of transequatorial VLF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 4, 693-703.

BANNISTER, P. R. [1979] Summary of extremely low frequency (ELF) field strength measurements made in Connecticut during 1975. *Radio Sci.*, Vol. 14, 1, 103-108.

BARR, R. [1971a] The propagation of ELF and VLF radio waves beneath an inhomogeneous anisotropic ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 33, 343-353.

BARR, R. [1971b] The effect of the earth's magnetic field on the propagation of ELF and VLF radio waves. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 33, 1577-1583.

BEUKERS, J. M. [1973] Accuracy limitations of the OMEGA navigation system employed in differential mode. *J. Inst. Nav.*, Vol. 20, **1**, 81-92.

BEUKERS, J. M. [1974] A review and application of VLF and LF transmissions for navigation and tracking. *J. Inst. Nav.*, Vol. 21, **2**, 117-133.

BICKEL, J. E. [1967] VLF attenuation rates deduced from aircraft observations near the antipode of NPM. *Radio Sci.*, Vol. 2, (Nouvelle Série), 575-580.

BICKEL, J. E., FERGUSON, J. A. et STANLEY, G. V. [1970] Experimental observations of magnetic field effects on VLF propagation at night. *Radio Sci.*, Vol. 5, 19-25.

BLAIR, B. E., CROW, E. L. et MORGAN, A. H. [1967] Five years of VLF world-wide comparison of atomic frequency standards. *Radio Sci.*, Vol. 2, (Nouvelle Série), 627-636.

BUDDEN, K. G. [1955] The numerical solution of differential equations governing reflection of long radio waves from the ionosphere. *Proc. Roy. Soc.*, A227, 516-537.

BUDDEN, K. G. [1961] The waveguide-mode theory of wave propagation. Prentice Hall. Inc., Englewood Cliffs, NJ, Etats-Unis d'Amérique.

BURGESS, B. [1970] VLF phase delay variability and design of long range navigation aids. *Phase and Frequency stabilities in Electromagnetic wave Propagation*, Ed. K. Davies, Technivision, Slough, Royaume-Uni.

BURROWS, M. L. [1978] *ELF Communications Antennas.* Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, Royaume-Uni.

BURROWS, M. L. et NIESSEN, C. W. [1972] ELF communication system design. IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment, 95-107.

CASSELMAN, C. J., HERITAGE, D. P. et TIBBALS, M. L. [1959] VLF propagation measurements for the Radux-Omega navigation system. *Proc. IRE*, Vol. 47, 829-839.

CHAPMAN, F. W., LLANWYN JONES, D., TODD, J. D. W. et CHALLINOR, R. A. [1966] Observations on the propagation constant of the earth-ionosphere waveguide in the frequency band 8 c/s to 16 kc/s. *Radio Sci.*, Vol. 1, 1273-1282.

CHILTON, C. J., CRARY, J. H. et CROMBIE, D. D. [1969] A comparison of middle and low latitude sunrise VLF fading observed on the 1967 voyage of the Oceanographer. Proc. of the Third International Symposium on Equatorial Aeronomy, Ahmedabad, India, 3-8 février, Vol. 1, 105-113.

COMPUTATION LABORATORY AT CAMBRIDGE [1945] *Tables of the Modified Hankel Functions of Order One-Third and of their Derivatives.* Harvard University Press, Cambridge, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

CROMBIE, D. D. [1964] Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 27-34.

CROMBIE, D. D. [1966] Further observations of sunrise and sunset fading of VLF signals. *Radio Sci.*, Vol. 1, (New Series), 47-51.

CROMBIE, D. D. [1967] The waveguide mode propagation of VLF radio waves to great distances. IEE (London) Conf. Publ., 36.

CROMBIE, D. D., ALLAN, A. H. et NEWMAN, M. [1958] Phase variations of 16 kHz transmissions from Rugby, observed in New Zealand. *Proc. IEE*, Vol. 105B, 301-304.

DAVIS, J. R. [1976] Localized nighttime D-region disturbances and ELF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 38, 1309-1317.

DAVIS, R. M. et BERRY, L. A. [1977] A revised model for the electron density in the lower ionosphere. Command and Control Technical Center (DCA), Tech. Rep. 111077, NTIS, Accession No. AD 17883. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, USA.

FERGUSON, J. A. [1980] Ionospheric profiles for predicting night-time VLF/LF propagation. NOSC TR 530, NTIS, Accession No. ADA 085399. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, USA.

FOLEY, G., WAND, I. C. et JONES, T. B. [1973] Studies of the modal parameters of VLF radio waves propagated below the night-time ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 2111-2122.

FRISIUS, J., HEYDT, G. et HARTH, W. [1970] Observations of parameters characterising the VLF atmospherics activity as a function of the azimut. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 1403-1422.

GALEJS, J. [1967a] Propagation of VLF waves below an anisotropic stratified ionosphere with a transverse static magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 2, (New Series), 557-574.

GALEJS, J. [1967b] Propagation of VLF waves below anisotropic ionosphere models with a dipping static magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 2, (New Series), 1497-1512.

GALEJS, J. [1972] *Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves.* Pergamon Press, New York/Oxford.

GALLENBERGER, R. et SWANSON, E. [1971] Variations in Omega propagation parameters. NELC/TR 1773, Naval Electronics Laboratory Center, San Diego, Ca., Etats-Unis d'Amérique.

HARTH, W. [1971] Sudden anomalies of spectral atmospherics parameters during SID's. Proc. VLF Symposium, Ødo-Sandefjord, Norvège.

HAUSER, J. P. et RHOADS, F. J. [1974] Coverage predictions for the Navy's fixed VLF transmitters. Naval Research Laboratory Report, NRL-MR-2884, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.

HUGHES, H. G. [1971] Differences between pulse trains of ELF atmospherics at widely separated locations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 2116-2125.

HUGHES, H. G. et GALLENBERGER, R. J. [1974] Propagation of extremely low-frequency (ELF) atmospherics over a mixed day-night path. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 36, 1643-1661.

HUGHES, H. G., GALLENBERGER, R. J. et PAPPERT, R. A. [1974] Evaluation of night-time exponential ionospheric models using VLF atmospherics. *Radio Sci.*, Vol. 9, 1109-1116.

HUGHES, H. G. et PAPPERT, R. A. [1975] Propagation prediction model selection using VLF atmospherics. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 2, 96-98.

HUGHES, H. G. et THEISSEN, J. F. [1970] Diurnal variations in the apparent attenuations of ELF atmospherics over two different propagation paths. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 2795-2801.

IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING [juillet 1984] Special Issue on ELF communications. Vol. OE-9.

JOHLER, J. R. et LEWIS, R. L. [1969] Extra-low frequency terrestrial radio-wave field calculations with the zonal harmonic series. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 2459-2470.

KAISER, A. B. [1969] An explanation of VLF diurnal phase change observations. *Radio Sci.*, Vol. 4, 17-21.

KIKUCHI, T. [1983] Anomalous diurnal phase shifts of Omega VLF waves (10-14 kHz) on the east-west low latitude and transequatorial paths. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 743-751.

KIKUCHI, T. et OHTANI, A. [1984] Anomalous interference in Omega VLF wave propagation on east-to-west equatorial paths. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 46, 697-703.

KUHNLE, P. F. et SMITH, R. D. [1964] Rome Air Development Center, Tech. Rep. RADC-TR-64-360, NTIS, Accession No. ADAOC1701, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

LEWIS, R. L. et JOHLER, J. R. [1976] Correction of numerical results in «ELF terrestrial radio wave field calculations with the zonal harmonic series». *Radio Sci.*, Vol. 11, 75-81.

LEWIS, E. A., RASMUSSEN, J. E. et KOSSEY, P. A. [1973] Measurements of ionospheric reflectivity from 6 to 35 kHz, *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, **19**, 3903-3912.

LYNN, K. J. W. [1967] Anomalous sunrise effects observed on a long transequatorial VLF propagation path. *Radio Sci.*, Vol. 2, (New Series), 521-530.

LYNN, K. J. W. [1969] Multisite observations of the VLF transequatorial propagation anomaly. *Radio Sci.*, Vol. 4, 203-211.

LYNN, K. J. W. [1973] VLF mode conversion observed at middle latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 439-452.

LYNN, K. J. W. [1975] The transequatorial reception of Omega (13.6 kHz) transmissions. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1395-1399.

LYNN, K. J. W. [1977] VLF modal interference over west-east paths. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 39, 347-357.

LYNN, K. J. W. [1978] Some differences in diurnal phase and amplitude variations for VLF signals. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 145-150.

MAHMOUD, S. F. et BEAL, J. C. [1971] VLF propagation parameters derived from observations of sunrise and sunset phenomena. *Proc. IEE*, Vol. 118, 1351-1357.

MEARA, L. A. [1973] VLF modal interference effects observed on transequatorial paths. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 305-315.

MORFITT, D. G. [1971] Analysis of a multimode propagation concept for predicting VLF signal strengths at night. Naval Electronics Laboratory Center Tech. Rep. TR 1798, NTIS, Accession No. AD738846, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

MORFITT, D. G. [1973] Computer techniques for fitting electron density profiles to oblique-path VLF propagation data. Naval Electronics Laboratory Center Tech. Rep. TR 1854, NTIS, Accession No. AD757341, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

MORFITT, D. G. [1977] Effective electron density distributions which describe VLF/LF propagation data. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. TR141, NTIS, Accession No. ADA047508, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

MORFITT, D. G. et SHELLMAN, C. H. [1976] MODESRCH, an improved computer program for obtaining ELF/VLF/LF mode constants. Naval Electronics Laboratory Center Interim Rep. 771, NTIS, Accession No. ADA032573, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

NARD, G. [1972] Results of recent experiments with differential OMEGA. *J. Inst. Nav.*, **19**, 2.

PAGLIARULO, R. P., TURTLE, J. P., RASMUSSEN, J. E., COOLEY, R. L. et KLEMETTI, W. I. [1979] VLF/LF reflectivity of the polar ionosphere – September 1978 to 5 May 1979. Reports RADC-TR-79-178 and 273. Rome Air Development Center, Griffiss Air Force Base, NY, Etats-Unis d'Amérique.

PAPPERT, R. A. [1968] A numerical study of VLF mode structure and polarization below an anisotropic ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 3, (New Series), 219-233.

PAPPERT, R. A. [1970] Effects of elevation and ground conductivity on horizontal dipole excitation of the earth-ionosphere waveguide. *Radio Sci.*, Vol. 5, 579-590.

PAPPERT, R. A. et BICKEL, J. E. [1970] Vertical and horizontal VLF fields excited by dipoles of arbitrary orientation and elevation. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1445-1452.

PAPPERT, R. A., GOSSARD, E. E. et ROTHMULLER, I. J. [1967] A numerical investigation of classical approximations used in VLF propagation. *Radio Sci.*, Vol. 2, 387-400.

PAPPERT, R. A. et MOLER, W. F. [1974] Propagation theory and calculations at lower extremely low frequencies (ELF). *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-22, 438-451.

PAPPERT, R. A. et MORFITT, D. G. [1975] Theoretical and experimental sunrise mode conversion results at VLF. *Radio Sci.*, Vol. 10, 537-546.

PAPPERT, R. A. et SHOCKEY, L. R. [1971] WKB Mode summing program for VLF/LF antennae of arbitrary length, shape and elevation. Naval Electronics Laboratory Center Interim Rep. 713, NTIS, Accession No. AD728414, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PAPPERT, R. A. et SHOCKEY, L. R. [1972a] Mode conversion program for an inhomogeneous anisotropic ionosphere. Naval Electronics Laboratory Center Interim Rep. 722, NTIS, Accession No. AD743948, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PAPPERT, R. A. et SHOCKEY, L. R. [1972b] WKB fields program for lower ELF. Naval Electronics Laboratory Center Interim Rep. 731, NTIS, Accession No. AD757080, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PAPPERT, R. A. et SHOCKEY, L. R. [1976] Simplified VLF/LF mode conversion program with allowance for elevated, arbitrarily oriented electric dipole antennae. Naval Electronics Laboratory Center Interim Rep. 771, NTIS, Accession No. ADA033412, National Technical Information Service, Springfield, Va., 22161, Etats-Unis d'Amérique.

PAPPERT, R. A. et SMITH, R. R. [1972] Orthogonality of VLF height gains in the earth ionosphere waveguide. *Radio Sci.*, Vol. 7, 275-278.

PAPPERT, R. A. et SNYDER, F. P. [1972] Some results of a mode-conversion programme for VLF. *Radio Sci.*, Vol. 7, 913-923.

RAWLES, A. T. et BURGESS, B. [1967] Results of the two-frequency VLF transmission experiments from Criggion GBZ. *Radio Sci.*, Vol. 2, 1295-1301.

REDER, F. [1979] Propagation effects on Omega signals and methods of reducing them. Fourth Annual Meeting of the International Omega Association, San Diego, 10-12 de septembre, Calif. Etats-Unis d'Amérique.

RHOADS, F. J. et GARNER, W. E. [1967] An investigation of the modal interference of VLF radio waves. *Radio Sci.*, Vol. 2, (New Series), 539-546.

RINNERT, K. [1973] Electron density profiles in the lower ionosphere deduced from long path VLF wave propagation. *Radio Sci.*, Vol. 8, 829-836.

RUGG, D. E. [1967] Theoretical investigation of the diurnal phase and amplitude variations of VLF signals. *Radio Sci.*, Vol. 2, 551-556.

SHEDDY, C. H. [1968] A general analytic solution for reflection from a sharply bounded anisotropic ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 3, **8**, 792-795.

SNYDER, F. P. et PAPPERT, R. A. [1969] A parametric study of VLF transequatorial propagation anomaly. *Radio Sci.*, Vol. 4, 213-226.

STEELE, F. K. et CROMBIE, D. D. [1967] Frequency dependence of VLF fading at sunrise. *Radio Sci.*, Vol. 2, (New Series), 547-549.

SUZUKI, K., BABA, K., YOSHIOKA, T. et KINOSHITA, M. [1973] Phase variation and amplitude fading of NWC – 22.3 kHz signal at dawn. *J. Geomag. Geoelect.*, Vol. 25, 403-413.

TAYLOR, W. L. et SAO, K. [1970] ELF attenuation rates and phase velocities observed from slow-tail components of atmospherics. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1453-1460.

VOLLAND, H. [1966] Die Ausbreitung langer Wellen (Propagation d'ondes longues). *Veröffentlichungen des NKGG der DDR, Reihe 11*, Vol. 2, 3-126.

VOLLAND, H., HEYDT, G. et HARTH, W. [1970] Statistical measurement of the spectral amplitude and phase of atmospherics in the VLF range. *Phase and Frequency Stabilities in Electromagnetic Wave Propagation.* Ed. K. Davies, Technivision, Slough, Royaume-Uni.

WAIT, J. R. [1962] *Electromagnetic Waves in Stratified Media.* Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WAIT, J. R. [1964] Two-dimensional treatment of mode theory of the propagation of VLF radio waves. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 81-93.

WAIT, J. R. [1968a] Mode conversion and refraction in the earth-ionosphere wave-guide for VLF radio waves. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 3535-3548.

WAIT, J. R. [1968b] On the theory of VLF propagation for a step model of the non-uniform earth-ionosphere wave-guide. *Can. J. Phys.*, Vol. 46, 1979-1983.

WAIT, J. R. [1970] Factorization method applied to electromagnetic wave propagation in a curved wave-guide with non-uniform walls. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1059-1068.

WAIT, J. R. (ed.) [1974] Special issue on extremely low frequency (ELF) communications. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-22, **4**.

WAIT, J. R. [1977] Propagation of ELF electromagnetic waves and project SANGUINE/SEAFARER. *IEEE J. Ocean Eng.*, Vol. OE-2, **2**, 161-171.

WAIT, J. R. et SPIES, K. P. [1965] Influence of finite ground conductivity on the propagation of VLF radio waves. *NBS J. Res.*, Vol. 69D, 1359-1373.

WAIT, J. R. et SPIES, K. P. [1968] On the calculation of mode conversion at a graded height change in the earth-ionosphere wave-guide at VLF. *Radio Sci.*, Vol. 3, 787-791.

WALKER, D. [1965] Phase steps and amplitude fading of VLF signals at dawn and dusk. *NBS J. Res.*, Vol. 69D, 1435-1443.

WATT, A. D. [1967] *VLF Radio Engineering.* Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

WESTERLUND, S. et REDER, F. H. [1973] VLF radio signals propagating over the Groenland ice-sheet. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1475-1491.

WESTERLUND, S., REDER, F. H. et ABOM, C. [1969] Effects of polar cap absorption events on VLF transmissions. *Planet. Space Sci.*, Vol. 17, 1329-1374.

WILLIM, D. K. [1974] Sanguine *ELF-VLF Radiowave Propagation*, 251-261. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Pays-Bas.

Documents du CCIR

[1982-86]: 6/228 (GTI 6/5).

BIBLIOGRAPHIE

Documents du CCIR

[1978-82]: 6/242 (GTI 6/5).

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉSOLUTIONS, VŒUX ET DÉCISIONS

QUESTION 25-1/6

PROPRIÉTÉS DE L'IONOSPHÈRE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que les milieux ionisés ont une influence sur la propagation des ondes radioélectriques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles sont les propriétés de l'ionosphère terrestre et des régions ionisées situées au-delà, qui ont sur la propagation des effets importants pour les systèmes radioélectriques?

Note. – Voir les Rapports 250, 262, 340, 725, 726, 886, 887, 1011 et les Recommandations 373 et 434.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25A/6

PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES A L'IONOSPHÈRE ÉQUATORIALE AFFECTANT LES RADIOCOMMUNICATIONS

(1978)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

variations des propriétés physiques et de la structure de l'ionosphère, à l'équateur magnétique ou au voisinage de celui-ci, qui ont une influence sur les radiocommunications, et influence, sur ces variations:

- de l'emplacement géographique,
- de l'heure du jour,
- de la saison,
- de l'activité solaire et de l'activité magnétique,
- de l'activité orageuse.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25B/6

PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES A L'IONOSPHÈRE AUX LATITUDES ÉLEVÉES AFFECTANT LES RADIOCOMMUNICATIONS

(1978)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

propriétés physiques et structure de l'ionosphère aux latitudes élevées qui ont une influence sur les radiocommunications de Terre et sur les radiocommunications Terre-espace et influence, sur ces propriétés:

- des rayonnements ionisants du Soleil et des précipitations de particules solaires,
- de l'emplacement géographique et magnétique,
- de l'activité solaire et de l'activité magnétique,
- de la position de l'ovale auroral,
- de l'heure du jour,
- de la saison.

Note. – Voir le Rapport 886.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25C/6

PROPAGATION PAR DIFFUSION LATÉRALE ET RÉTRODIFFUSION

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'on a observé que des ondes radioélectriques propagées par l'ionosphère arrivent sous des azimuts qui diffèrent considérablement de la direction du grand cercle;

b) qu'une onde radioélectrique propagée par l'ionosphère peut donner lieu à une rétrodiffusion par le sol ou par l'ionosphère elle-même,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. reconnaissance de diverses sources de diffusion latérale et de rétrodiffusion situées au sol et dans l'ionosphère;

2. détermination, par des mesures de champ, du coefficient de diffusion latérale et de rétrodiffusion en fonction de la fréquence, de la nature de la source de diffusion et de l'angle d'incidence sur cette source;

3. détermination, par des mesures de diffusion latérale et de rétrodiffusion, de types de propagation peu courants tels que la persistance d'échos provenant de grandes distances, des effets de focalisation et des caractéristiques des irrégularités de l'ionosphère.

Note. – Voir le Rapport 726.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25D-1/6

PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE A GRANDE DISTANCE SANS RÉFLEXION INTERMÉDIAIRE SUR LE SOL

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues peuvent être guidées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre par un mode de propagation dit mode des sifflements;

b) que, notamment aux basses latitudes magnétiques, la propagation des ondes hectométriques et décamétriques peut résulter d'un guidage par des irrégularités d'ionisation alignées suivant les lignes de force du champ magnétique terrestre, au-dessus de l'ionisation maximale de la région F;

c) qu'on a observé pour les ondes décamétriques et métriques une propagation à grande distance sans réflexion intermédiaire sur le sol, impliquant des trajets situés au-dessous de l'ionisation maximale de la région F, et que les distances ainsi franchies vont de la distance maximale que peut normalement franchir en un seul bond un rayon émis sous un faible angle de site, jusqu'au tour complet de la Terre,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination de la variation des propriétés physiques et de la structure de l'ionosphère qui ont une influence sur la propagation à grande distance sans réflexion intermédiaire sur le sol, selon:

- l'emplacement géographique,
- l'heure du jour et de la saison,
- l'activité solaire et l'activité magnétique;

2. détermination de l'influence de la fréquence d'exploitation dans des conditions ionosphériques données sur:

- les modes de propagation,
- la longueur du trajet de propagation,
- les angles de site et d'azimut au départ et à l'arrivée;

3. élaboration de méthodes permettant de prévoir l'occurrence de la propagation ionosphérique à grande distance sans réflexion intermédiaire sur le sol;

4. influence de ce type de propagation sur les communications Terre-espace et espace-espace.

Note. – Voir les Rapports 250 et 262.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25E/6

PROPAGATION RADIOÉLECTRIQUE A TRAVERS LES MILIEUX EXTRATERRESTRES IONISÉS, SOLAIRES OU AUTRES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'un modèle simple de l'atmosphère ionisée du Soleil et des ionosphères des planètes fournirait une base aux études de propagation que demande la planification des vols spatiaux à proximité du Soleil et des planètes;

b) que des modèles simples du plasma extraterrestre fourniraient une base analogue pour les vols dans l'espace lointain,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des caractéristiques de l'atmosphère ionisée du Soleil, des ionosphères des planètes et de leurs effets combinés sur la propagation radioélectrique;

2. détermination des caractéristiques et des effets du plasma extraterrestre en ce qui concerne la propagation radioélectrique sur des distances allant des distances interplanétaires aux distances intergalactiques.

Note. – Voir le Rapport 887.

PROGRAMME D'ÉTUDES 25F/6

MODIFICATION DE L'IONOSPHÈRE PAR DES MOYENS CHIMIQUES

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des expériences d'émissions de produits chimiques à l'aide de fusées ont entraîné une modification de l'ionosphère;

b) que les effluents laissés par le passage de véhicules spatiaux dans l'ionosphère peuvent entraîner des modifications involontaires de l'ionosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. mesure dans laquelle les propriétés de l'ionosphère, en particulier la densité électronique et la fréquence des chocs, sont modifiées par des émissions intentionnelles ou non de produits chimiques;

2. effets nuisibles que ces modifications peuvent éventuellement avoir sur les signaux de télécommunication qui parviennent dans les régions modifiées;

3. avantages que les télécommunications pourraient retirer d'une modification contrôlée de l'ionosphère provoquée par des émissions de produits chimiques.

Note. – Voir le Rapport 1011.

QUESTION 26/6

PRÉVISIONS IONOSPHÉRIQUES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que des prévisions quantitatives précises des variations de l'ionosphère permettront d'utiliser les fréquences radioélectriques de façon plus efficace et d'accroître la fiabilité des systèmes radioélectriques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

de quelles données ionosphériques et solaires a-t-on besoin pour mieux prévoir la qualité de fonctionnement des systèmes radioélectriques influencée par l'ionosphère?

Note. – Voir les Rapports 255, 430, la Recommandation 371 et le Vœu 82.

PROGRAMME D'ÉTUDES 26A/6

PRÉVISIONS A LONG TERME D'INDICES SOLAIRES ET IONOSPHÉRIQUES

(1978)

LE CCIR,

CONSIDÉRANT

que les prévisions à long terme d'indices solaires et ionosphériques sont essentielles pour l'utilisation pratique des prévisions ionosphériques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. comparaison, entre elles et avec les résultats d'observations, de prévisions d'indices solaires et ionosphériques effectuées selon les méthodes d'autocorrélation ou de quasi-autocorrélation qui ont été publiées; ces comparaisons devraient être tenues à jour;

2. examen approfondi des combinaisons de méthodes d'autocorrélation, de méthodes empiriques et autres, qui permettraient peut-être d'obtenir des prévisions plus exactes.

Note. – Voir la Recommandation 371, la Résolution 74 et les Vœux 23 et 82.

PROGRAMME D'ÉTUDES 26B-1/6

PRÉVISIONS POUR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

qu'il est souhaitable d'établir des prévisions quantitatives précises pour la propagation ionosphérique,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des méthodes les plus commodes pour calculer la MUF de référence d'après des caractéristiques ionosphériques prévues;

2. statistiques des variations de la MUF d'exploitation et de la MUF de référence, en fonction de la saison, de l'activité solaire et de l'emplacement, en vue d'apporter aux prévisions mensuelles les ajustements voulus et d'analyser les différences que la MUF d'exploitation et la MUF de référence présentent d'une heure à une autre et d'un jour à un autre;

3. importance des diverses couches de l'ionosphère et des divers modes de propagation du point de vue des radiocommunications;

4. utilité possible de méthodes de tracé des rayons et de modèles perfectionnés des couches de l'ionospère pour améliorer les prévisions pour l'incidence oblique déduites des prévisions pour l'incidence verticale;

5. possibilité de prévoir les fréquences critiques de la région F qui sont dépassées pendant des pourcentages de temps spécifiés (par exemple 90%, 50%, 10%, 1% et 0,1%).

Note. – Voir le Rapport 255, la Recommandation 371 et la Résolution 4.

PROGRAMME D'ÉTUDES 26C/6

AMÉLIORATION DU PROGRAMME MONDIAL D'OBSERVATIONS IONOSPHÉRIQUES POUR LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le réseau mondial actuel d'ionosondes au sol qui fonctionnent régulièrement et participent à l'échange mondial de renseignements est loin d'être idéal pour prévoir la propagation dans et à travers l'ionosphère;

b) que les observations régulièrement effectuées à partir de satellites pourraient être utilisées pour la cartographie numérique, mais que:

- les sondages par satellites ne sont actuellement pas assez fréquents dans certaines régions pour permettre d'en déduire avec précision des valeurs médianes de foF2 et de h_{max};
- le nombre de stations de télémesure des satellites est actuellement encore très limité;

c) que d'autres observations régulières de l'ionosphère pourraient être utilisées pour la cartographie numérique de l'ionosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des régions géographiques dans lesquelles, pour les prévisions à long terme ou à court terme:

- l'installation d'au moins une ionosonde fixe apporterait une amélioration sensible et nécessaire,
- la densité actuelle des ionosondes fixes régulièrement exploitées est plus que suffisante;

2. possibilités pratiques d'utiliser pour les travaux de cartographie numérique les résultats des observations ionosphériques provenant de satellites, lorsque celles-ci sont régulièrement effectuées:

- en comparant les résultats des sondages effectués en contre-bas, en contre-haut et dans l'ionosphère en vue de déterminer si des brouillages, des gradients horizontaux de la densité électronique ou l'existence de trajets obliques, causent des erreurs systématiques,
- en déterminant les régions où l'installation de nouvelles stations de télémesure permettrait d'améliorer la couverture;

3. possibilités d'améliorer les travaux de cartographie numérique en y incorporant les résultats des observations de la luminiscence atmosphérique, des observations ionosphériques effectuées par des sondeurs sous incidence oblique (y compris les sondeurs à rétrodiffusion à effet très directif) ou par d'autres techniques lorsque ces observations sont régulièrement effectuées.

Note 1. – Le Directeur du CCIR est prié de bien vouloir transmettre ce texte à l'Union radio-scientifique internationale (URSI) et au Comité spécial pour la physique Soleil-Terre (SCOSTEP), aux fins de commentaires.

Note 2. – Voir le Rapport 430 et le Vœu 22.

PROGRAMME D'ÉTUDES 26D-1/6

PRÉVISION DE L'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'apparition d'une ionisation sporadique de la région E constitue l'un des principaux éléments permettant de prévoir les conditions de propagation ionosphérique;

b) qu'il existe différentes sortes d'ionisation sporadique dans la région E, dont certaines peuvent être identifiées par les observations ionosphériques;

c) que l'analyse statistique des résultats des observations par ionosonde, sans prendre en considération les différentes sortes d'ionisation sporadique de la région E, pour complète et intéressante qu'elle soit à certains points de vue, n'a pas conduit à développer des techniques adéquates pour la prévision de l'ionisation sporadique de la région E,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. déterminer la faisabilité de prévoir l'ionisation sporadique de la région E, selon la sorte d'ionisation indiquée par les enregistrements d'ionosonde;

2. déterminer la relation entre les sortes d'ionisation sporadique de la région E enregistrées par les ionosondes, les mécanismes physiques qui donnent naissance à ces sortes d'ionisation et les conditions de propagation radioélectrique.

QUESTION 27/6

CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATION POUR LES RADIOCOMMUNICATIONS IONOSPHÉRIQUES Y COMPRIS TRANSIONOSPHÉRIQUES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'on pourrait utiliser le spectre avec plus d'efficacité et améliorer la fiabilité des services de radiocommunication si l'on disposait de prévisions quantitatives précises à court terme des variations de l'ionosphère quelques heures ou quelques jours à l'avance;

b) qu'en plus des perturbations étendues liées à d'importants événements géophysiques ou solaires, l'ionosphère est sujette à des variations d'une heure à l'autre et d'un jour à l'autre (dont l'influence peut être locale) dont les effets sur des caractéristiques d'exploitation des systèmes à ondes décamétriques et à ondes métriques ou décimétriques, comme la MUF d'exploitation, et sur les caractéristiques associées aux affaiblissements, au bruit atmosphérique, aux évanouissements, aux brouillages dus à la propagation par trajets multiples, au temps de propagation de groupe et à la diffusion ne peuvent pas être prévus par des techniques bien arrêtées,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quels sont les besoins et les techniques en matière de prévisions à court terme (quelques heures ou quelques jours à l'avance) des caractéristiques d'exploitation des radiocommunications ionosphériques y compris transionosphériques?

Note. – Voir les Rapports 249, 727, 888, 889, 890, 1012 et la Recommandation 313.

PROGRAMME D'ÉTUDES 27A/6

VARIATIONS A COURT TERME ET PERTURBATIONS DES CIRCUITS RADIOÉLECTRIQUES IONOSPHÉRIQUES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que la qualité de fonctionnement des circuits radioélectriques peut être défavorablement influencée par les variations à court terme de l'ionosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. examen de la possibilité pratique:

- de choisir des observations solaires particulières ou des observations de phénomènes géophysiques pouvant être effectuées objectivement et appliquées utilement à la prévision à court terme des conditions de propagation ionosphérique,
- d'établir une méthode unifiée pour donner des perturbations ionosphériques une description dynamique adéquate qui puisse servir aux prévisions et aux vérifications et qui comporte des indices permettant de caractériser l'intensité d'une perturbation dans son ensemble ou pendant chacun des intervalles d'une succession de courts intervalles de temps de même durée;

2. examen de la relation entre les caractéristiques d'une perturbation, telles qu'elles ont été définies et décrites ci-dessus, et la qualité de fonctionnement attendue de circuits radioélectiques de divers types.

Note. – Voir les Rapports 727, 888, 889, 1012, la Recommandation 313, la Décision 10 et le Vœu 67.

PROGRAMME D'ÉTUDES 27B-1/6

ÉVALUATION DES VOIES DE CIRCUITS RADIOÉLECTRIQUES IONOSPHÉRIQUES

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la qualité du signal peut varier considérablement dans l'étendue de la bande des fréquences dans laquelle des radiocommunications ionosphériques sont possibles;

b) que des brouillages provenant d'autres utilisateurs ou d'origine artificielle peuvent rendre inutilisable une fréquence susceptible de se propager par l'ionosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. utilité des sondages ionosphériques ou de l'évaluation des voies (mesures) pour permettre l'estimation en temps réel de la qualité possible des circuits et la gestion opérationnelle des fréquences de circuits radioélectriques;

2. modes de propagation existants et leurs limites de fréquence, intensité des signaux et sa distribution statistique, retard de groupe et dispersion de fréquence;

3. comparaison des données ainsi obtenues avec les valeurs prévues correspondantes.

Note. – Voir le Rapport 889 et la Décision 10.

PROGRAMME D'ÉTUDES 27C/6

GESTION OPÉRATIONNELLE DES FRÉQUENCES DES CIRCUITS RADIOÉLECTRIQUES IONOSPHÉRIQUES

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les variations diurnes des caractéristiques ionosphériques obligent généralement à utiliser des fréquences d'émission différentes selon les heures;

b) que le brouillage dû à d'autres émissions peut interdire l'emploi de fréquences d'émission qui, autrement, conviendraient parfaitement;

c) que les perturbations ionosphériques entraînent d'importants changements dans les fréquences utilisables,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. techniques de sélection des fréquences quelques minutes ou quelques heures à l'avance, de manière à conserver une qualité d'exploitation satisfaisante aux circuits radioélectriques ionosphériques;

2. méthodes permettant de prévoir la qualité de fonctionnement d'un circuit ionosphérique quelques minutes à l'avance par observation des tendances que manifestent les caractéristiques du signal reçu.

Note. — Voir les Rapports 888, 889, 1012 et la Décision 10.

PROGRAMME D'ÉTUDES 27D/6

DIFFUSION LATÉRALE ET RÉTRODIFFUSION (UTILISATION EN EXPLOITATION)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que les phénomènes de diffusion latérale et de rétrodiffusion ionosphériques donnent lieu à des échos que l'on peut utiliser dans bien des conditions d'exploitation,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer l'étude suivante:

étude de l'application des techniques de diffusion latérale et de rétrodiffusion à la détermination des conditions de propagation et à l'identification des types inhabituels de propagation.

Note. — Voir les Rapports 889 et 890 et la Décision 10.

QUESTION 28/6

FACTEURS AFFECTANT LA CONCEPTION DES SYSTÈMES

(1978)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les caractéristiques de la propagation ionosphérique qui ont une influence sur la conception des systèmes radioélectriques, ou qui peuvent provoquer des brouillages entre systèmes;

2. quelles sont les caractéristiques théoriques des antennes utilisées dans les systèmes mettant en jeu la propagation ionosphérique et dans quelle mesure sont-elles compatibles avec les données expérimentales?

Note. — Voir les Rapports 251, 260, 262, 263, 266, 574, 728, 891, 892, 893 et les Recommandations 531 et 532.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28A/6

CARACTÉRISTIQUES DE LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE QUI ENTRENT EN JEU LORS DE LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION DE TERRE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'exploitation des radiocommunications nécessite, non seulement la connaissance de la valeur médiane du champ reçu, mais encore des renseignements sur:
- la répartition de son amplitude,
- la rapidité de ses variations,
- l'évanouissement différentiel avec systèmes d'antennes à diversité d'espace, de fréquence ou de polarisation;

b) qu'il est devenu habituel de distinguer entre:
- variations rapides,
- variations beaucoup plus lentes (c'est-à-dire variations d'une heure à l'autre ou d'un jour à l'autre),
- variations régulières en fonction de l'heure, de la saison et de l'activité solaire;

c) que la présence de divers modes et trajets de propagation, qui donnent les signaux composants sur l'antenne de réception, affecte sensiblement la caractéristique de temps (réponse impulsionnelle) ainsi que les caractéristiques d'espace et de fréquence,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. distributions des valeurs du signal pour des variations de courte durée et variations d'un jour à l'autre des valeurs médianes horaires du signal, y compris les caractéristiques des évanouissements résultant de l'effet combiné des variations rapides et lentes;

2. distribution de la rapidité et de la variation des évanouissements;

3. fonctions de corrélation relatives au fonctionnement en diversité;

4. mesure dans laquelle les résultats statistiques ci-dessus sont influencés par des facteurs tels que:
- effets des trajets multiples, y compris le déphasage relatif pour chaque mode,
- l'effet Doppler,
- la fréquence, notamment par rapport à la MUF de référence du trajet,
- l'heure, la saison et l'activité solaire,
- la longueur du trajet et son orientation par rapport au champ magnétique terrestre;

5. nature et signification relative des mécanismes physiques qui produisent les variations du signal, tels que:
- effets dus aux caractéristiques géographiques et géomagnétiques de différentes régions (en particulier aux latitudes polaires, aurorales, moyennes et équatoriales), compte tenu du fait que, dans certains cas, l'un de ces facteurs peut avoir une influence importante sur les effets d'un autre (il est par exemple probable que l'on devra étudier séparément les effets de la saison et de l'activité solaire dans chacune des grandes régions géographiques et géomagnétiques).

Note 1. – Le Directeur du CCIR est prié de porter ce Programme d'études à l'attention de l'Union radio-scientifique internationale (URSI).

Note 2. – Voir le Rapport 266.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28B/6

EFFETS DE L'IONOSPHÈRE SUR LES RADIOCOMMUNICATIONS SPATIALES AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 1,6 MHz ENVIRON

(1978)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. utilité éventuelle, en tant que moyen de communication entre la Terre et l'espace, des ondes de fréquences inférieures à 1,6 MHz environ guidées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre, et notamment des ondes myriamétriques;

2. possibilités de brouillages causés, dans cette partie du spectre, par des ondes se propageant dans l'ionosphère et à travers l'ionosphère;

3. calcul du champ ou de l'affaiblissement de transmission pour diverses extrémités du trajet de propagation;

4. impédance et diagrammes de directivité d'antennes situées dans l'ionosphère.

Note. — Voir le Rapport 262.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28C-1/6

EFFETS DE L'IONOSPHÈRE SUR LES SYSTÈMES SPATIAUX AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz ENVIRON

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que, dans le cas de certains systèmes spatiaux de grande qualité, il convient de tenir compte des effets de l'ionosphère jusqu'aux fréquences les plus élevées utilisées,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. méthodes de mesure et de prévision:
- de la réfraction, notamment en ce qu'elle influe sur la direction d'arrivée des ondes ainsi que sur les temps de propagation de phase et de groupe,
- des effets d'affaiblissement,
- de l'effet Doppler,
- de l'effet Faraday, notamment pour ce qui est de la discrimination de polarisation,
- des effets de la scintillation sur la phase, l'angle d'arrivée, l'amplitude et la polarisation,
- du degré de protection assuré par l'ionosphère,
- des effets de l'ionosphère et, notamment, des irrégularités naturelles et artificielles de l'ionosphère, sur la détermination de la zone de coordination pertinente;

2. possibilité d'existence de modes de propagation guidée entre engins spatiaux.

Note. — Voir le Rapport 263 et la Recommandation 531.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28D-1/6

CARACTÉRISTIQUES DE PROPAGATION QUI AFFECTENT LE PARTAGE DU SPECTRE RADIOÉLECTRIQUE ENTRE SYSTÈMES DE TERRE FAISANT INTERVENIR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le partage du spectre radioélectrique est un aspect important de l'emploi efficace du spectre;

b) que, si l'on veut optimiser l'utilisation du spectre pour les besoins du service, une évaluation de la qualité des circuits est indispensable,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. études des caractéristiques de la propagation ionosphérique qui affectent le partage du spectre radioélectrique entre systèmes de Terre;

2. estimation de la fiabilité d'un système de radiocommunication évalué seulement en présence de bruit, ou en présence de bruit et de brouillage.

Note. — Voir le Rapport 892.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28E-1/6

PROBLÈMES PARTICULIERS DE RADIOCOMMUNICATIONS LIÉS A L'IONOSPHÈRE DANS CERTAINES RÉGIONS GÉOGRAPHIQUES

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que les propriétés physiques et la structure de l'ionosphère ont une influence sur les radiocommunications de Terre et sur les radiocommunications Terre-espace et que ces propriétés peuvent dépendre:

- de l'emplacement géographique,
- de l'heure du jour,
- de la saison,
- de l'activité solaire et de l'activité magnétique,
- de l'activité orageuse,
- des rayonnements ionisants du Soleil et des précipitations de particules solaires,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. caractéristiques des radiocommunications utilisant l'ionosphère, compte tenu:

- de la fréquence de travail,
- de la classe d'émission et de la largeur de bande,
- des caractéristiques d'antenne,
- du terrain et des conditions climatiques,
- de la situation, de l'orientation et de la longueur du trajet de propagation,

en accordant une attention spéciale aux problèmes particuliers rencontrés aux latitudes élevées et au voisinage de l'équateur magnétique;

2. détermination des programmes d'observation et des techniques de mesure qui permettront d'obtenir des données sur les caractéristiques des radiocommunications dans des zones géographiques particulières.

Note. – Voir le Rapport 886.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28F-1/6*

EFFETS IONOSPHÉRIQUES DUS A DES ÉMISSIONS A GRANDE PUISSANCE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'au moyen d'émissions d'ondes kilométriques, hectométriques et décamétriques de puissance moyenne ou de grande puissance, on a provoqué des modifications dans les régions D, E et surtout F de l'ionosphère;

b) qu'il peut devenir techniquement possible de transmettre à la Terre de l'énergie électrique en provenance d'un engin spatial au moyen d'émissions radioélectriques et que la grande puissance associée à ces rayonnements pourrait avoir des effets défavorables sur la propagation dans l'ionosphère des ondes radioélectriques destinées à d'autres services;

c) que l'utilisation croissante d'émissions radioélectriques de grande puissance risque d'aggraver les problèmes de brouillage par transmodulation ionosphérique dans les régions D et E,

---

* Le Directeur du CCIR est prié de porter ce Programme d'études à l'attention de l'Union radio-scientifique internationale (URSI), ainsi que de la Commission d'études 10.

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. pour les modifications de l'ionosphère, déterminer:

1.1 aux différentes latitudes géographiques et géomagnétiques, dans quelle mesure sont modifiées la densité, la température et la fréquence de choc des électrons, ainsi que la façon dont ces phénomènes dépendent de la fréquence et de la puissance de l'onde incidente sur les diverses régions de l'ionosphère;

1.2 les interactions et les modifications ionosphériques que peut provoquer la transmission d'énergie électrique à partir de l'espace;

1.3 les effets nuisibles que ces modifications peuvent éventuellement avoir sur les signaux de télécommunication qui parviennent dans les régions modifiées;

1.4 quels avantages les télécommunications pourraient retirer d'une modification de l'ionosphère intentionnellement provoquée;

2. pour la transmodulation ionosphérique, déterminer:

2.1 les caractéristiques de l'ionosphère (densité électronique, température, fréquence de choc, gyrofréquence, etc.) qui tendent à favoriser l'apparition de la transmodulation ionosphérique;

2.2 l'influence sur la transmodulation des facteurs suivants:

- fréquences porteuses,
- fréquence de modulation,
- taux de modulation,
- puissance isotrope rayonnée équivalente,
- polarisation,
- emplacement géographique;

2.3 les méthodes permettant de minimaliser la transmodulation.

Note. – Voir les Rapports 574, 728, 893 et la Recommandation 532.

PROGRAMME D'ÉTUDES 28G/6

ÉVALUATION DES CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES UTILISÉES POUR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

qu'il convient de rassembler des renseignements au sujet:

a) des caractéristiques théoriques des antennes utilisées pour la propagation ionosphérique, ainsi que des paramètres de polarisation des ondes et des effets de la proximité d'un sol irrégulier;

b) de la concordance entre valeurs mesurées et valeurs théoriques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. mise au point, pour tous les types d'antennes actuellement utilisés, d'expressions théoriques (en tenant compte, le cas échéant, des effets d'un sol irrégulier) relatives aux caractéristiques de fonctionnement suivantes:

- la résistance de rayonnement;
- le gain d'antenne par rapport à un élément rayonnant isotrope en espace libre, donné séparément pour les composantes de l'onde polarisées horizontalement et verticalement, ainsi que les phases relatives de ces deux composantes. Ces valeurs doivent être déterminées en fonction des angles de site et d'azimut dans toutes les directions au-dessus du plan horizontal;

2. comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs équivalentes déduites des mesures des caractéristiques ci-dessus mentionnées, notamment pour le rayonnement à de petits angles de site et dans des directions où l'on prévoit des valeurs nulles et compte tenu, s'il y a lieu, de structures proches entraînant un rerayonnement.

Note. – Voir le Rapport 891.

QUESTION 29-1/6*

BRUIT RADIOÉLECTRIQUE

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le bruit radioélectrique, d'origine naturelle ou artificielle, détermine souvent la limite pratique de performance des systèmes radioélectriques et qu'il constitue en conséquence un facteur important pour une planification de l'utilisation efficace du spectre;

b) que l'on sait déjà beaucoup de choses sur l'origine, les caractéristiques statistiques et les puissances habituelles du bruit radioélectrique, tant naturel qu'artificiel, mais que la planification des systèmes de télécommunications exige que l'on recueille davantage de renseignements;

c) que, pour concevoir des systèmes, déterminer leurs performances et les facteurs d'utilisation du spectre, il est essentiel de spécifier les caractéristiques du bruit décrites dans les Rapports 322 et 413 (Oslo, 1966) et pour lesquelles il existe de bonnes méthodes de mesure, comme celles décrites dans le Rapport spécial N° 7 de l'URSI, dans le Rapport 413 (Oslo, 1966) et dans les références bibliographiques qui y sont contenues,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles sont les puissances, les variations selon le temps et l'emplacement géographique, les directions d'arrivée, ainsi que les relations avec les variations des phénomènes géophysiques tels que l'activité solaire, du bruit radioélectrique naturel ou artificiel provenant de sources locales ou éloignées?

Note 1. – D'autres études sur le bruit radioélectrique sont de la compétence des Commissions d'études 1 et 5 (voir les Questions 46/1, 5/5 et le Programme d'études 5C/5 § 4).

Note 2. – Voir les Rapports 254, 258, 322, 342, la Recommandation 372, le Vœu 85 et la Décision 21.

PROGRAMME D'ÉTUDES 29A-1/6

BRUIT RADIOÉLECTRIQUE DANS L'IONOSPHÈRE ET AU-DELÀ

(1978-1982)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. caractéristiques du bruit radioélectrique reçu dans un engin spatial évoluant dans l'ionosphère ou au-dessus d'elle, et dont l'origine peut être:

- galactique ou extra-galactique (bruit cosmique),
- solaire,
- planétaire et interplanétaire,
- ionosphérique (engendré dans l'ionosphère ou dans la magnétosphère),
- terrestre (bruit atmosphérique ou artificiel);

2. techniques et méthodes dont on peut disposer ou qui pourront être mises au point pour la prévision des niveaux de bruit radioélectrique reçus à bord d'un engin spatial.

Note. – Voir le Rapport 342.

---

* Cette Question doit être portée à la connaissance des Commissions d'études 1 et 5 pour information.

PROGRAMME D'ÉTUDES 29B/6

MESURE DU BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ATMOSPHÉRIQUE ENGENDRÉ PAR LES ÉCLAIRS

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des renseignements sur le bruit atmosphérique figurent dans le Rapport 322;

b) que ledit Rapport contient maintenant des renseignements sur les répartitions statistiques à court terme des amplitudes du bruit et sur les facteurs d'incertitude de prévision, en plus de données améliorées sur la répartition mondiale de la puissance de bruit reçue par une courte antenne verticale mise à la terre;

c) que ces éléments, ainsi que d'autres caractéristiques du bruit, ont été reconnus comme exerçant un rôle important dans l'estimation des brouillages affectant les services radioélectriques;

d) qu'il est nécessaire d'effectuer des mesures supplémentaires pour réviser ce Rapport et pour étendre son domaine d'application;

e) que, dans l'évaluation de l'intensité et des propriétés du bruit radioélectrique, il est très utile de connaître la répartition des éclairs, la puissance qu'ils rayonnent ainsi que l'influence de la propagation,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. répartition mondiale de la puissance de bruit, les mesures étant faites, soit directement, soit par déduction à partir d'autres caractéristiques, à l'aide du réseau, existant ou élargi, des stations de mesures;

2. autres caractéristiques du bruit déjà décrites dans le Rapport 322;

3. mesure, dans les stations pourvues d'installations appropriées, du bruit atmosphérique capté par des antennes de télécommunication classiques ayant des caractéristiques de directivité et de polarisation diverses, et corrélation entre les résultats obtenus et les données relatives à la répartition des orages;

4. fréquence d'occurrence des éclairs dans le monde entier, déterminée:

- par l'emploi de réseaux de compteurs conçus pour l'enregistrement des décharges proches,
- par l'emploi de réseaux de radiogoniométrie conçus pour localiser les orages à une certaine distance,
- par l'analyse d'autres mesures connexes effectuées au niveau du sol, par exemple des mesures faisant appel à des installations de radiodétection,
- par l'emploi d'éléments montés à bord de satellites et sensibles au rayonnement électromagnétique des éclairs,
- par l'examen des photographies de nuages prises à partir de satellites;

5. intensité et nature du bruit dû aux décharges orageuses individuelles et influence de la propagation;

6. distribution, pendant de brèves périodes de temps au cours desquelles les données statistiques ne varient pas, de la durée des impulsions de bruit et des intervalles de temps qui les séparent; ces contributions seraient mesurées en fonction du seuil;

7. spectre de puissance, ou fonction d'autocorrélation correspondante, de la forme d'onde de l'enveloppe de bruit et distributions de probabilité d'ordre supérieur, par exemple celles donnant la probabilité pour que des signaux dont l'enveloppe de tension est spécifiée, apparaissent deux fois de suite, séparés par un petit intervalle de temps de durée connue;

8. développement plus poussé de méthodes utilisant des données statistiques relatives aux caractéristiques du bruit, autres que la puissance moyenne, aux fins d'évaluation du brouillage causé aux services radioélectriques;

9. importance relative du bruit atmosphérique par rapport aux autres types de brouillage, comme facteur limitatif de la qualité des radiocommunications.

Note. – Voir les Rapports 254, 322 et la Décision 21.

PROGRAMME D'ÉTUDES 29C-1/6

BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ARTIFICIEL

(1978-1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, pour assurer une bonne utilisation du spectre, il est utile de connaître les propriétés des rayonnements additifs parasites provenant de sources artificielles;

b) que la plupart des mesures du bruit artificiel faites jusqu'à présent ont surtout porté sur les sources individuelles, le principal objectif étant d'atténuer les bruits plutôt que d'en déterminer l'effet d'ensemble;

c) que les résultats des études antérieures sont difficilement comparables, en raison notamment des limitations technologiques et des objectifs différents que s'étaient assignés les diverses Commisions d'études;

d) qu'il y a des raisons de penser que le bruit radioélectrique artificiel constitue le facteur limitatif de la réception des signaux radioélectriques dans une large gamme de fréquences,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. mesurer les caractéristiques statistiques du bruit radioélectrique composite d'origine artificielle;

2. étudier la différence entre ces caractéristiques lorsqu'elles sont observées avec des antennes de types différents;

3. rechercher des méthodes qui permettraient de déterminer les caractéristiques du bruit artificiel que l'on obtiendrait avec divers types d'antennes lorsque les données se rapportent à un type particulier d'antenne;

4. rechercher la corrélation entre les caractéristiques du bruit artificiel et le degré d'urbanisation (c'est-à-dire la densité de la population, l'activité industrielle, la distribution et la consommation d'énergie électrique, la circulation des véhicules automobiles, etc.);

5. déterminer la variation de ces caractéristiques en fonction de l'emplacement géographique, du temps et de la fréquence.

Note. – Voir le Rapport 258, la Recommandation 372 et la Décision 21.

PROGRAMME D'ÉTUDES 29D/6

NIVEAUX DE BRUIT PRÉVUS DANS LA BANDE DE FRÉQUENCES 535-1705 kHz DANS LA RÉGION 2

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que la Résolution 5 de la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes hectométriques (Région 2) demande au CCIR de procéder à l'étude du bruit constaté dans la Région 2 dans la bande de fréquences 535-1705 kHz;

b) que des données de bruit pertinentes sont indiquées dans les Rapports 322 et 258, mais que des données plus récentes pourront être obtenues,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

distribution statistique à l'intérieur de la Région 2 du champ de bruit provenant à la fois de la foudre et des sources de bruit artificielles, dans la bande de fréquences 535-1705 kHz.

QUESTION 30/6

CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz

(1978)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelle est la meilleure méthode permettant de calculer le champ de l'onde ionosphérique et la qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences supérieures à 1,6 MHz?

Note. – Voir le Rapport 252 et Supplément au Rapport 252, les Rapports 253, 259, 571, 729, 894 et les Recommandations 533 et 534.

PROGRAMME D'ÉTUDES 30A-2/6

ÉVALUATION DU CHAMP ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz

(1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les méthodes provisoires pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique, dans le cas des ondes décamétriques (Rapport 252, Supplément au Rapport 252 et Rapport 894), pourraient n'être pas toujours suffisamment complètes ou précises;

b) que des méthodes appropriées pour évaluer le champ de l'onde ionosphérique dans le cas des ondes décamétriques sont nécessaires:

- aux administrations lors de la création et de l'exploitation de systèmes radioélectriques,
- à l'IFRB pour l'amélioration de ses normes techniques,
- à l'UIT en vue des futures conférences administratives,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. absorption ionosphérique, en vue d'obtenir des renseignements quantitatifs sur ses variations selon l'emplacement géographique, le temps et la fréquence, sur sa variabilité d'un jour à l'autre et sur sa relation avec les indices d'activité solaire;

2. affaiblissement de transmission dans le cas où la fréquence de travail est voisine de la MUF de référence ou lui est supérieure;

3. caractéristiques géométriques du trajet du rayon, et notamment: rôle des gradients d'ionisation dans l'ionosphère, propagation hors du plan du grand cercle, focalisation et défocalisation, différences des angles d'arrivée et de départ des ondes, propagation à grande distance sans réflexion intermédiaire au sol;

4. modèles ionosphériques améliorés, pour aider à mieux déterminer les modes actifs;

5. influence d'une ionisation anormale, comme l'ionisation sporadique de la région E et F-diffus, sur les caractéristiques géométriques du rayon, sur l'absorption et sur la diffusion;

6. pertes par réflexion au sol lors d'une propagation ionosphérique à bonds multiples, et plus particulièrement:

- importance relative des mécanismes de diffusion et des réflexions de Fresnel dans diverses conditions,
- influence des types extrêmes de terrain tels que forêt tropicale, montagne, glace, toundra;

7. variations du niveau du signal dans un intervalle horaire et variations d'un jour à l'autre de la valeur médiane horaire du niveau du signal et de la MUF de référence pour différents modes de propagation, diverses fréquences, diverses situations géographiques des circuits, enfin pour des conditions normales et pour des conditions perturbées;

8. rôle de la polarisation pour les signaux émis et reçus, compte tenu des propriétés magnéto-ioniques de l'ionosphère;

9. caractéristiques du système (notamment de l'antenne et des systèmes de diversité) de nature à améliorer la qualité des signaux reçus;

10. précision des méthodes provisoires, notamment aux grandes distances;

11. possibilité d'utiliser des programmes informatiques et des méthodes manuelles.

Note. – Voir le Rapport 252 et le Supplément au Rapport 252, les Rapports 253, 571, 729, 892, 894, la Recommandation 533, la Décision 6 et les Vœux 45 et 68.

PROGRAMME D'ÉTUDES 30B-2/6

PROPAGATION DES ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES PAR L'INTERMÉDIAIRE DE L'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E ET D'AUTRES RÉGIONS DE L'IONOSPHÈRE

(1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les informations dont on dispose sur la propagation dans l'environnement terrestre à incidence oblique par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la région E et d'autres phénomènes d'ionisation anormale sont insuffisantes pour fournir aux ingénieurs les données statistiques dont ils ont besoin, notamment pour les basses et hautes latitudes;

b) que des irrégularités de l'ionosphère dans les régions E et F risquent d'affecter la qualité de fonctionnement des systèmes radioélectriques utilisant les bandes d'ondes métriques et décimétriques du spectre;

c) que des méthodes appropriées pour évaluer le champ de l'onde ionosphérique et la dispersion des signaux dans le cas des ondes métriques sont nécessaires:

- aux administrations lors de la création et de l'exploitation de systèmes radioélectriques,
- à l'IFRB pour l'amélioration de ses normes techniques,
- à l'UIT en vue des futures conférences administratives,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. préparation de cartes mondiales et régionales simples, tant numériques que graphiques, du niveau du signal reçu par rapport au niveau en espace libre ou de l'affaiblissement de transmission, à des fréquences appropriées pour les modes anormaux, tels que l'ionisation sporadique de la région E, dont on a constaté qu'ils présentent de l'importance;

2. identification des mécanismes de la propagation dans l'environnement terrestre des ondes métriques et décimétriques selon les régions de l'ionosphère;

3. préparation de données statistiques quant à la probabilité d'apparition de divers modes de propagation ionosphérique.

Note. – Voir le Rapport 259, la Recommandation 534 et la Décision 11.

PROGRAMME D'ÉTUDES 30C/6*

ÉLABORATION DE MÉTHODES FONDÉES SUR L'UTILISATION DE MICRO-ORDINATEURS POUR L'ÉVALUATION DES CONDITIONS DE PROPAGATION DES ONDES DÉCAMÉTRIQUES ET DE LA QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS

(Question 30/6)

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, pour certaines applications, l'évaluation de modèles représentant les conditions de propagation et la qualité de fonctionnement des circuits, nécessaires à la planification, à la conception et à l'exploitation des services à ondes décamétriques, peut être compromise par la disponibilité plus ou moins grande d'ordinateurs puissants;

b) que, dans de nombreux cas, les micro-ordinateurs et les calculatrices de poche de la génération actuelle ont une capacité de mémoire et une vitesse de fonctionnement convenables pour les calculs nécessaires;

c) que des prévisions assistées par micro-ordinateur présentent des avantages certains dans le cas des services mobiles et dans les pays en développement;

d) que ces prévisions sont également utiles pour les ingénieurs des radiocommunications qui ont des restrictions d'accès à des ordinateurs puissants;

e) qu'une certaine normalisation des paramètres à calculer et des procédures techniques à adopter, serait utile,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des types de service qui pourraient bénéficier de prévisions assistées par micro-ordinateur, des paramètres devant être calculés, des précisions recherchées et des délais dans lesquels ces renseignements sont nécessaires;

2. spécification des procédures techniques à appliquer pour pouvoir répondre aux besoins des différents services;

3. étude et appréciation des avantages offerts par les méthodes de prévision fondées sur l'utilisation de micro-ordinateurs actuellement utilisées.

Note. — Voir le Rapport 1013.

QUESTION 31-1/6

CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 1,7 MHz ENVIRON

(1978-1982)

Le CCIR

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelle est la meilleure méthode permettant de calculer le champ de l'onde ionosphérique et la qualité de fonctionnement des circuits aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ?

Note. — Voir les Rapports 265, 431, 432, 575, 895, 1015 et la Recommandation 435.

---

* Ce Programme d'études est signalé à l'attention des Commissions d'études 1, 3, 8 et 10.

PROGRAMME D'ÉTUDES 31C-2/6

MÉTHODE DE CALCUL DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE DANS LE SERVICE DE RADIODIFFUSION A ONDES HECTOMÉTRIQUES DESTINÉE A ÊTRE APPLIQUÉE DANS LA RÉGION 2 DE L'UIT

(1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le Rapport 575 du CCIR contient des méthodes de calcul du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences de la bande des ondes hectométriques et que la Conférence administrative de radiodiffusion à ondes hectométriques pour les Régions 1 et 3 les a adoptées pour en faire usage;

b) que les zones peuplées de la Région 2 couvrent une gamme de latitudes géomagnétiques de plus de 120°, et que l'on manque de données pour les trajets aux latitudes hautes et basses;

c) que, bien que les méthodes du Rapport 575 soient destinées à être appliquées sur une large échelle dans les diverses régions géographiques du monde, il est possible que, moyennant quelque révision, on puisse améliorer leur précision et leur utilité en vue de leur application spécifique à la planification de la radiodiffusion à ondes hectométriques dans la Région 2, et qu'une autre méthode pourrait être nécessaire,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

méthode à utiliser pour évaluer le champ de l'onde ionosphérique aux fins de planification dans la Région 2, aux fréquences de la bande des ondes hectométriques comprises entre 535 et 1705 kHz, en gardant présent à l'esprit que la simplicité est souvent nécessaire pour une telle application. Il convient d'accorder une attention particulière aux points suivants:

- caractéristiques spéciales des trajets de propagation aux latitudes hautes et basses;
- effets d'autres facteurs tels que fréquence, activité solaire, direction du trajet, etc.;
- champ pendant les périodes de transition (autour du lever et du coucher du Soleil) et pendant la journée;
- champ pour les trajets interrégionaux.

PROGRAMME D'ÉTUDES 31D/6

PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 1,7 MHz ENVIRON

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que des nouvelles données sur la propagation aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ sont nécessaires;

b) qu'il est souhaitable d'améliorer les méthodes de prévision et la qualité des circuits à ces fréquences,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. poursuite des mesures, sous incidence verticale et sous incidence oblique, aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ;

2. effets de la nature physique et de la structure de l'ionosphère sur la propagation sous incidences verticale et oblique dans cette gamme de fréquences;

3. variation de l'amplitude du champ et de sa phase en fonction de la fréquence et de la distance, compte tenu:

- de l'emplacement géographique du trajet de propagation et de son orientation,
- de l'heure, de la saison et de l'activité solaire,
- de l'effet de conditions de propagation variant le long du trajet,
- de la nature diffuse et turbulente de l'ionosphère,
- des effets des perturbations ionosphériques, y compris ceux provenant du rayonnement solaire et des particules,
- de l'influence de la conductivité du sol au voisinage des extrémités du trajet,

– de l'effet de la distance des extrémités à la mer, et de la présence d'îles ou de bras de mer,
– des affaiblissements de couplage de polarisation, en particulier dans les régions tropicales et sur les trajets à plusieurs bonds,
– de la non-réciprocité de la propagation,
– des effets météorologiques;

4. mise au point de modèles mathématiques applicables à la propagation à grande distance, qui permettent le calcul de la phase des ondes aussi bien que de leur amplitude;

5. précision des méthodes de prévision du champ figurant dans les Rapports 575 et 265 et l'Annexe I à la Recommandation 435, dans le but d'améliorer cette précision, et d'étendre la gamme de fréquences;

6. méthodes de prévision d'autres caractéristiques de la propagation telles que les variations diurnes de phase, la stabilité de phase et la polarisation;

7. possibilité d'utiliser des programmes d'ordinateur et des méthodes manuelles.

Note. – Voir les Rapports 431, 432, 575, 265, 895 et 1015, la Recommandation 435, les Vœux 46 et 69 et la Décision 9.

RÉSOLUTION 4-3

DIFFUSION DE RENSEIGNEMENTS RELATIFS AUX INDICES FONDAMENTAUX POUR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(1963-1966-1974-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que R_{12}, IG_{12} et Φ ont été recommandés en tant qu'indices à utiliser pour la propagation ionosphérique (Recommandation 371);

b) qu'il y a intérêt à mettre à la disposition des administrations les valeurs observées et prévues les plus récentes de ces indices,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. de prier le Directeur du CCIR:

1.1 de prendre les dispositions voulues pour obtenir la valeur moyenne mensuelle de Φ ainsi que les données solaires et ionosphériques nécessaires pour le calcul des valeurs mensuelles des indices R_{12} et IG_{12};

1.2 de faire publier ces indices dans le *Journal des télécommunications* ainsi que toutes prévisions des indices que peuvent fournir les administrations et les organisations;

2. d'inviter les organisations qui obtiennent actuellement des données solaires et ionosphériques fondamentales utiles pour l'élaboration de ces indices à poursuivre leurs observations et à en transmettre les résultats au Directeur du CCIR.

RÉSOLUTION 63-2

PROGRAMMES D'ORDINATEUR POUR LA PRÉVISION DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPHÉRIQUES, DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET DES BRUITS

(1978-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les Rapports du CCIR contiennent la description de méthodes de prévision de l'état de l'ionosphère et des caractéristiques de propagation des ondes radioélectriques;

b) que, pour utiliser efficacement les méthodes en question, on a besoin de programmes d'ordinateur ainsi que des données numériques de référence à leur associer;

c) qu'il est coûteux pour les diverses organisations d'établir leurs propres programmes d'ordinateur en vue de faire ces prévisions,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. de charger le Directeur du CCIR:

1.1 d'inviter les organismes qui, à l'heure actuelle, ont leurs propres programmes d'ordinateur, leurs propres données numériques de référence et la documentation connexe concernant les méthodes de prévision décrites dans les Rapports et les Recommandations de la Commission d'études 6, à étudier la possibilité de mettre ces éléments d'information à la disposition des autres membres du CCIR par l'intermédiaire du Secrétariat du CCIR;

1.2 d'élaborer des programmes d'ordinateur en langage normalisé (si de tels programmes n'existent pas déjà), ainsi que les données numériques et la documentation appropriée;

1.3 de produire ces programmes et renseignements numériques pour diffusion ou vente aux administrations membres et à d'autres organismes;

1.4 d'établir des listes des programmes d'ordinateur et des données numériques de référence disponibles et de les publier dans les documents appropriés du CCIR et dans le Journal des télécommunications, ainsi que des descriptions et des exemples techniques à l'appui.

ANNEXE I

LISTE DES MÉTHODES DE PRÉVISION DÉCRITES DANS LES RAPPORTS ET LES RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 6, POUR LESQUELLES ON PEUT SE PROCURER DES PROGRAMMES D'ORDINATEUR AUPRÈS DU SECRÉTARIAT DU CCIR

1. Méthode provisoire du CCIR pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre les limites approximatives de 2 et 30 MHz (Rapport 252) (HFMLOSS):

– prévision de l'affaiblissement de transmission et du champ à une distance connue d'un émetteur dont on connaît la puissance rayonnée, pour un emplacement géographique, un niveau d'activité solaire et une heure du jour ou de la nuit quelconques.

2. Deuxième méthode provisoire du CCIR pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre les limites approximatives de 2 et 30 MHz (Supplément au Rapport 252) (SUP 252):

– prévision de l'affaiblissement de transmission et du champ à une distance connue d'un émetteur dont on connaît la puissance rayonnée, pour un emplacement géographique, un niveau d'activité solaire et une heure du jour ou de la nuit quelconques.

3. Caractéristiques et applications des données relatives au bruit radioélectrique atmosphérique (Rapport 322-2) et au bruit radioélectrique artificiel (Rapport 258) (NOISEY):

– prévision de la puissance du bruit et du champ sur toute fréquence au-dessus de 10 kHz, pour un emplacement géographique et une heure quelconques.

4. Atlas CCIR des caractéristiques ionosphériques (Rapport 340) (MUFFY, HRMNTH, WOMAP):

– prévision pour un emplacement géographique quelconque, à des heures données et pour des emplacements donnés, à une heure quelconque, des caractéristiques suivantes:
  a) médiane de foF2 (coefficients numériques d'Oslo)
  b) médiane de foF2 (coefficients numériques de New Delhi)
  c) médiane de M(3000)F2
  d) médiane de foE
  e) médiane de foF1
  f) médiane, décile supérieur et décile inférieur de foEs – maximum et minimum de l'activité solaire
  g) médiane, décile supérieur et décile inférieur de fbEs – minimum de l'activité solaire
  h) médiane de h'F – maximum et minimum de l'activité solaire
  j) médiane de h'F,F2 – maximum et minimum de l'activité solaire
  k) probabilité d'occurrence de F-diffus – maximum et minimum de l'activité solaire;
– prévision pour un trajet de propagation et une heure quelconques des MUF de référence des couches E et F.

5. Méthode simple de prévision de la MUF et du champ pour la propagation des ondes décamétriques (Rapport 894) (REP 894):

– prévision de la MUF et du champ médian.

Note. – Les programmes sont écrits en langage FORTRAN 4 et sont compatibles avec le système IBM. Ils sont disponibles sur bandes magnétiques dont les caractéristiques sont les suivantes:

– 9 pistes
– Code: EBCDIC *ou* ASCII/ISO 7
– Densité: 800 *ou* 1600 bit/pouce

– Avec *ou* sans labels (normalement sans labels)
– Longueur de l'enregistrement: fixe (de préférence de 80 caractères) *ou* variable.

Lors de la commande auprès du CCIR, il convient de spécifier les options souhaitées.

ANNEXE II

DONNÉES NUMÉRIQUES DE RÉFÉRENCE QU'ON PEUT SE PROCURER AUPRÈS DU CCIR POUR L'APPLICATION DES MÉTHODES ÉNUMÉRÉES DANS L'ANNEXE I

Pour certaines méthodes de prévision énumérées en Annexe I, des données de référence particulières s'imposent. Ces dernières sont inscrites sur trois bandes magnétiques, appelées bandes de données 1-3. Chaque bande a été élaborée dans le but d'être utilisée pour des procédures et des programmes bien particuliers, mais dans la mesure où elles contiennent chacune un certain nombre d'ensembles de données différents, elles peuvent avoir été utilisées dans le passé à d'autres buts.

On trouvera au Tableau I la liste des données disponibles sur chacune des bandes et des indications concernant les documents d'origine auxquels elles se réfèrent.

TABLEAU I – *Contenu des bandes de données ionosphériques 1-3*

	Données	Document d'origine	Numéro de la bande		
			1	2	3
1	foF2 (coefficients d'Oslo)	Rapport 340, Partie 2	x		x
2	foF2 (coefficient de New Delhi)	Rapport 340, Partie 2		x	
3	M(3000)F2	Rapport 340, Partie 2	x	x	x
4	foE	Rapport 252	x	x	
5	foEs médiane et décile	Rapport 340, Partie 5	x	x	x
6	h'F	Rapport 340, Partie 7	x	x	
7	h'F, F2	Rapport 340, Partie 7			x
8	F_u et F_l	Rapport 252	x	x	x
9	Régression de la MUF avec K	Barghausen et autres [1969]	x	x	
10	Surcroît d'affaiblissement de système Médiane et écarts types	Rapport 252	x	x	
11	Surcroît d'affaiblissement du système Incertitudes	Barghausen et autres [1969]	x	x	
12	T_u et T_l	Supplément au Rapport 252			x
13	Frontières terre/mer	Rapport 252	x	x	x
14	Puissance de bruit atmosphérique à 1 MHz (représentation en temps local)	Rapport 322-2	x		
15	Puissance de bruit atmosphérique à 1 MHz (représentation en temps universel)	Rapport 322-2		x	x
16	Dépendance de la fréquence, écarts des déciles et incertitudes de prévision de la puissance de bruit atmosphérique	Rapport 322-2	x	x	x
17	Champ magnétique terrestre	Rapport 340, Partie 2			x
18	Coordonnées géomagnétiques corrigées	Supplément au Rapport 252			x

Les caractéristiques des bandes magnétiques sont identiques à celles figurant en Annexe I, à l'exception de la longueur d'enregistrement, fixée à 120 caractères. On dispose aussi d'un programme pour convertir les bandes au format binaire. Des détails supplémentaires sur le contenu des bandes magnétiques peuvent être obtenus auprès du CCIR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARGHAUSEN, A. F., FINNEY, J. W., PROCTOR, L. L. et SCHULTZ, L. D. [1969] Predicting long-term operational parameters of high-frequency sky-wave telecommunication systems. ESSA Tech. Rep. ERL 110-1TS 78, US Govt. Printing Office, Washington, DC.

ANNEXE III

BANQUES DE DONNÉES DE MESURES DU CHAMP DISPONIBLES SUR BANDES MAGNÉTIQUES AUPRÈS DU SECRÉTARIAT DU CCIR

1. Banque de données C

Elle comprend les champs mesurés en ondes décamétriques pour 180 combinaisons de circuits et de fréquences (fréquences comprises entre 4,8 et 26 MHz) et pour des longueurs de trajet comprises entre 175 et 25 000 km.

2. Banque de données D

Elle comprend les champs mesurés en ondes décamétriques pour 181 combinaisons de circuits et de fréquences (fréquences comprises entre 2,5 et 26 MHz) et pour des longueurs de trajet comprises entre 175 et 26 000 km.

ANNEXE IV

NOUVELLES APPLICATIONS DES TECHNIQUES D'ORDINATEUR AUX MÉTHODES DE PRÉVISION DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 6

1. Il serait utile d'avoir des exemples sur les programmes d'ordinateur et les données suivants:

- Méthode de prévision du champ de l'onde ionosphérique pour les fréquences comprises entre 150 et 1600 kHz (Annexe I à la Recommandation 435).

  Note. – Un programme d'ordinateur a été développé pour l'utilisation de cette méthode par Inuki et autres [1983].

- Méthode du CCIR pour calculer le champ en présence d'ionisation sporadique de la région E (Annexe I à la Recommandation 534).

- Gain d'antenne figurant dans le Supplément au Rapport 252, c'est-à-dire: prévision des gains d'antenne dans une direction quelconque pour les types d'antenne suivants:
  a) demi-doublet vertical à la masse
  b) doublet vertical
  c) doublet horizontal
  d) antenne en losange horizontale avec impédance terminale
  e) antenne log-périodique horizontale
  f) antenne Yagi horizontale
  g) rideau de doublets horizontaux à écran parfaitement conducteur
  h) antenne en V inclinée avec impédance terminale
  j) antenne en losange inclinée avec impédance terminale
  k) antenne à long fil inclinée
  l) antenne en L renversé
  m) antenne en demi-losange

n) doublet arbitrairement incliné
p) antenne en losange double inclinée
q) antenne verticale log-périodique
r) réseau d'antennes cadres.

Il faut noter que des progiciels de micro-ordinateur permettant de calculer les diagrammes des types d'antenne énumérés ci-dessous sont disponibles auprès du Secrétariat du CCIR:

- Réseaux de doublets demi-onde horizontaux pour ondes décamétriques (HFARRAYS) et antennes en losange horizontales pour ondes décamétriques (HFRHOMBS); voir les Circulaires de l'UIT N^{os} 22 et 22 *bis* du 3 décembre 1984.
- Réseaux composés d'un maximum de quatre éléments verticaux pour ondes kilométriques et hectométriques (LFMFANT); voir les Circulaires de l'UIT N^{os} 64 du 3 décembre 1985 et 64 *bis* du 26 juin 1986.
- Réseaux de doublets demi-onde horizontaux multibande à tir dévié ou non avec réflecteur apériodique sur un sol imparfaitement conducteur et pour ondes décamétriques (HFMULSLW); voir la Circulaire de l'UIT N° 95 du 13 août 1986.
- Réseaux de doublets demi-onde horizontaux, à bande simple ou double, à tir dévié ou non avec réflecteur à doublets accordés sur un sol imparfaitement conducteur et pour ondes décamétriques (HFDUASLW); voir la Circulaire de l'UIT N° 95 du 13 août 1986.

2. Les programmes et les données cités en Annexe 1 ont été préparés dans le but d'être utilisés par des ordinateurs puissants. Le micro-ordinateur, qui a l'avantage, par rapport à l'ordinateur puissant ou le mini-ordinateur, d'être d'un prix abordable et d'être portable, constitue dans de nombreux cas une alternative appropriée, qui s'adapte particulièrement bien aux applications pour le service mobile. On peut considérer, par conséquent, qu'il est souhaitable de pouvoir disposer de programmes destinés à des micro-ordinateurs et ayant trait aux méthodes de prévision de la Commission d'études 6, et qu'en conséquence leur développement doit être encouragé. (Voir le Programme d'études 30C/6.)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INUKI, H., WAKAI, N. et KURIKI, I. [septembre 1983] Développement du programme d'ordinateur pour la prévision du champ de l'onde ionosphérique (ondes kilométriques et ondes hectométriques) (en japonais). *Rev. Radio Res. Labs. Japon*, Vol. 29, **152**, 467-485.

RÉSOLUTION 74*

DÉTERMINATION DES NOMBRES DE TACHES SOLAIRES

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que l'Observatoire de Zurich a cessé d'établir les nombres relatifs de taches solaires R_Z depuis le 31 décembre 1980,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. de prier le Directeur du CCIR:

1.1 de reconnaître que, pour les besoins du CCIR, les nombres relatifs de taches solaires préparés par le Centre de données pour les indices des taches solaires (SIDC) dirigé par M. A. Koeckelenbergh à l'Observatoire de Belgique (Uccle), ont pris la suite des précédents nombres relatifs de taches solaires R_Z, à partir du 1er janvier 1981. Les nouveaux nombres relatifs internationaux de taches solaires sont désignés par le symbole R_I;

---

* Cette Résolution doit être portée à l'attention du CIUS, de l'UAI et de l'URSI.

1.2 de prendre note du fait que les services suivants, antérieurement fournis par l'Observatoire de Zurich, sont désormais assurés par le SIDC:

1.2.1 détermination et diffusion *rapide* mensuelle des *nombres relatifs internationaux provisoires de taches solaires* aux institutions et services internationaux qui ont besoin de ces données;

1.2.2 détermination et diffusion des *Prévisions des nombres relatifs internationaux mensuels lissés de taches solaires*;

1.2.3 détermination et diffusion annuelle des *nombres relatifs internationaux définitifs de taches solaires*;

1.3 de prendre note du fait que pendant quatre décennies les nombres relatifs de taches solaires ont été déterminés à Bruxelles au moyen d'un télescope ayant les mêmes dimensions que ceux qui sont utilisés à Zurich et Locarno et que le nombre R_I sera essentiellement fondé sur les données des Observatoires de Locarno et de Uccle, complétées par les données des Observatoires qui collaboraient auparavant avec l'Observatoire de Zurich;

1.4 de remplacer R_Z par R_I dans les documents du CCIR partout où ce sera nécessaire.

VŒU 22-4

SONDAGES RÉGULIERS DE L'IONOSPHÈRE

(Programme d'études 26C/6)

(1966-1970-1974-1978-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les observations régulières effectuées par le réseau actuel de stations au sol de sondage ionosphérique, ainsi que les résultats des programmes de sondages obliques et d'observations par satellite, constituent les bases d'améliorations continuelles des prévisions ionosphériques à court et à long terme;

b) qu'étant donné l'importance croissante de la recherche spatiale et des communications avec les stations spatiales, il sera nécessaire de continuer à recueillir régulièrement des renseignements sur l'ionosphère et, éventuellement, d'en modifier la nature et d'en augmenter le nombre;

c) que la Commission G de l'URSI a créé un Groupe consultatif du réseau d'ionosondes (INAG) qui est chargé de conseiller les stations de sondage ionosphérique en matière scientifique et de donner à l'URSI des avis sur les questions concernant l'ensemble du réseau,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU que les administrations s'efforcent:

1. de continuer l'exploitation du réseau d'ionosondes ainsi que l'échange des renseignements fondamentaux, pour lesquels il existe une forte demande, par l'intermédiaire des Centres mondiaux de données;

2. d'installer de nouvelles ionosondes ou de transférer des ionosondes existantes en des emplacements recommandés par le CCIR en exécution du Programme d'études 26C/6 ou bien d'aider les organisations responsables de l'installation de nouvelles ionosondes ou du déplacement des anciennes;

3. de consulter l'URSI (INAG) sur toutes questions concernant l'installation ou la fermeture de stations du réseau d'ionosondes ou sur des projets de modifications au programme d'exploitation ou d'analyse des ionogrammes;

4. d'encourager les travaux entrepris au titre du Programme d'études 26C/6 concernant l'emploi de données ionosphériques fournies par des programmes d'observations par satellite et d'étudier les possibilités d'utilisation, pour les prévisions ionosphériques, des données ainsi obtenues dont disposent maintenant les Centres mondiaux de données.

Note. – Le Directeur du CCIR est prié de transmettre le texte de ce Vœu à l'Union radio-scientifique internationale (URSI), ainsi qu'à l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), au Comité spécial pour la physique Soleil-Terre (SCOSTEP), au Comité scientifique pour les recherches antarctiques (SCAR) et au Comité pour les recherches spatiales (COSPAR), aux fins de commentaires.

VŒU 23-4*

OBSERVATIONS NÉCESSAIRES EN VUE DE L'ÉTABLISSEMENT DES INDICES FONDAMENTAUX POUR LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 26A/6)

(1966-1970-1974-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) qu'il est recommandé d'utiliser l'indice IG_{12} pour les prévisions des valeurs médianes mensuelles de foF2 pour des dates se situant certainement au cours des six mois et peut-être même au cours des douze mois suivant la date de la dernière valeur IG;

b) qu'il est recommandé d'utiliser l'indice Φ pour établir les prévisions des médianes mensuelles de foE, foF1 et foF2 certainement jusqu'à 6 mois, et peut-être même jusqu'à 12 mois à l'avance, par rapport à la date de la dernière observation de la valeur de Φ;

c) qu'il est recommandé d'utiliser la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires R_{12} comme indice pour toutes les prévisions ionosphériques faites plus de 12 mois à l'avance,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. d'encourager les treize stations d'observation ionosphérique suivantes, établies de longue date (ou celles qui les remplacent) à poursuivre leur activité en vue de l'établissement de l'indice IG_{12}:

Canberra	College	Johannesburg	Port Stanley
Christchurch	Delhi	Moscou	Slough
Churchill	Huancayo	Mundaring	Tokyo
			Wallops Island

2. d'encourager le National Research Council (NRC) à Ottawa (Canada) à poursuivre ses mesures de l'intensité de bruit solaire radioélectrique sur 10,7 cm, qui sont nécessaires à l'établissement de l'indice Φ;

3. d'encourager le Centre de données pour les indices des taches solaires (SIDC) dirigé par M. A. Koeckelenbergh, patronné par l'Observatoire royal de Belgique et l'Institut d'Astronomie de l'Université libre de Bruxelles, à poursuivre la détermination et la diffusion des nombres relatifs internationaux de taches solaires.

VŒU 45-2

APPRÉCIATION DES MÉTHODES DU CCIR POUR L'ÉVALUATION DU CHAMP ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ENTRE 2 ET 30 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1974-1982-1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que les méthodes pour l'évaluation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique, mises au point par le Groupe de travail intérimaire 6/1 conformément à la Décision 6 et exposées dans le Rapport 252 et son Supplément, sont considérées comme des méthodes provisoires;

b) que la méthode du Rapport 894 a servi de base pour la méthode de prévision adoptée par la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (HFBC(1)),

---

* Ce Vœu doit être porté à l'attention du NRC, du SIDC et de l'URSI.

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que les administrations et organisations apprécient les mérites de ces méthodes, compte tenu de leurs besoins respectifs, par exemple en les comparant avec leurs propres méthodes et avec leurs observations expérimentales;

2. que les administrations et organisations fassent connaître au Directeur du CCIR, à l'intention du Groupe de travail intérimaire 6/1, le jugement qu'elles auront porté sur ces méthodes.

Note. – Voir aussi le Vœu 68.

VŒU 46-1

ÉTABLISSEMENT D'UN FICHIER CENTRAL DE RÉSULTATS DE MESURES DE CHAMP EN ONDES HECTOMÉTRIQUES ET KILOMÉTRIQUES

(Programme d'études 31D/6)

(1974–1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que de nombreuses mesures du champ résultant du rayonnement produit par des émetteurs de radiodiffusion en ondes hectométriques et kilométriques et transmis par l'intermédiaire de l'ionosphère sont faites par divers centres de réception dans le monde entier;

b) que l'étude de ces résultats de mesures, et notamment des écarts entre les champs observés et les champs calculés par les méthodes recommandées par le CCIR ou par d'autres méthodes, serait d'une grande utilité pour améliorer ces méthodes de prévision;

c) que de telles études ne sont possibles que si les mesures sont faites avec des méthodes comparables;

d) que ces études seraient grandement facilitées si les résultats de mesure étaient présentés sous une forme normalisée,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que les administrations et les organisations qui effectuent des mesures du champ de l'onde ionosphérique d'émetteurs en ondes hectométriques et kilométriques soient invitées à communiquer au CCIR, sous une forme normalisée, les résultats de mesures dont elles disposent déjà et qu'à l'avenir ces administrations et organisations soient invitées à communiquer régulièrement aussi ceux dont elles disposeront;

2. que le CCIR s'organise de manière à pouvoir collecter ces résultats de mesures, les utiliser pour des études relatives aux méthodes de prévision du champ et les tenir éventuellement à la disposition des administrations ou organisations qui désireraient faire des études semblables;

3. que le CCIR précise les conditions dans lesquelles de telles mesures doivent être faites;

4. que le CCIR examine les formulaires provisoires reproduits dans les Annexes I, II et III, afin d'évaluer leur commodité et de décider si l'on peut en normaliser l'emploi.

ANNEXE I

FORMULAIRE DES MESURES DE CHAMP (O.km – O.hm)

(voir instructions détaillées)

01) Station émettrice

03) Date — Jour | Mois | Année

04) Station réceptrice

02) Fréquence — kHz

05) Coord. géograph. de la stat. réceptrice — E O — N S

06) Observation	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	UTC	00.00 ↓ 00.30	00.30 ↓ 01.00	01.00 ↓ 01.30	01.30 ↓ 02.00	02.00 ↓ 02.30	02.30 ↓ 03.00	03.00 ↓ 03.30	03.30 ↓ 04.00	04.00 ↓ 04.30	04.30 ↓ 05.00	05.00 ↓ 05.30	05.30 ↓ 06.00	06.00 ↓ 06.30	06.30 ↓ 07.00	07.00 ↓ 07.30	07.30 ↓ 08.00
E (50)	dB(μV/m)																

06) Observation	N°	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	UTC	08.00 ↓ 08.30	08.30 ↓ 09.00	09.00 ↓ 09.30	09.30 ↓ 10.00	10.00 ↓ 10.30	10.30 ↓ 11.00	11.00 ↓ 11.30	11.30 ↓ 12.00	12.00 ↓ 12.30	12.30 ↓ 13.00	13.00 ↓ 13.30	13.30 ↓ 14.00	14.00 ↓ 14.30	14.30 ↓ 15.00	15.00 ↓ 15.30	15.30 ↓ 16.00
E (50)	dB(μV/m)																

06) Observation	N°	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	UTC	16.00 ↓ 16.30	16.30 ↓ 17.00	17.00 ↓ 17.30	17.30 ↓ 18.00	18.00 ↓ 18.30	18.30 ↓ 19.00	19.00 ↓ 19.30	19.30 ↓ 20.00	20.00 ↓ 20.30	20.30 ↓ 21.00	21.00 ↓ 21.30	21.30 ↓ 22.00	22.00 ↓ 22.30	22.30 ↓ 23.00	23.00 ↓ 23.30	23.30 ↓ 24.00
E (50)	dB(μV/m)																

Instructions pour l'utilisation du formulaire de mesures de champ (O.km-O.hm)

1. Nom de la station émettrice

Indiquer le nom de la localité sous lequel la station est connue ou dans laquelle elle est située. Indiquer le nom tel qu'il figure dans la Liste internationale des fréquences, s'il y figure. Limiter le nombre de lettres et de chiffres à un maximum de quatorze.

2. Fréquence porteuse

Indiquer la fréquence porteuse de l'émetteur (en kHz).

3. Date

Indiquer la date de l'enregistrement.

4. Nom de la station réceptrice

Indiquer le nom de la localité sous lequel la station est connue ou dans laquelle elle est située. Limiter le nombre de lettres et de chiffres à un maximum de quatorze.

5. Coordonnées géographiques de la station réceptrice

Indiquer les coordonnées géographiques de la station réceptrice (longitude et latitude, en degrés et minutes).

6. Observations

Les observations doivent se faire exclusivement pendant les intervalles d'une demi-heure qui figurent dans le formulaire. On indiquera pour chaque période (numérotée de 1 à 48) la médiane semi-horaire effectivement mesurée du champ, $E(50)$, (non corrigée, par exemple pour tenir compte de la puissance rayonnée) exprimée en dB(μV/m). Si aucune mesure n'a été effectuée, la case correspondante sera laissée en blanc.

Si le résultat est douteux par suite de brouillages, de forts évanouissements ou d'effets d'une éruption solaire, on n'indiquera aucune valeur. Si le résultat est inférieur au seuil de l'appareil de mesure, on indiquera «T» dans la position de gauche de la case. Si la valeur mesurée est négative, le signe doit figurer dans cette position.

Exemples:

1. $E(50)$ = 60,3 dB(μV/m) — 6 0 3
2. $E(50)$ = 0 dB(μV/m) — 0 0
3. $E(50)$ = −12,8 dB (μV/m) — − 1 2 8
4. $E(50)$ inférieur au seuil du récepteur — T

ANNEXE II

FICHE DE DESCRIPTION DES STATIONS RÉCEPTRICES (O.km – O.hm)
(voir instructions détaillées)

Station réceptrice			
01) Nom	02) Pays	03) Coordonnées géographiques de l'antenne	
		Longitude (degrés et minutes)	Latitude (degrés et minutes)
		E O	N S

04) Conductivité du sol avoisinant (S/m)							
2	3	4	5	6	7	8	9
3×10^{-2}	10^{-2}	3×10^{-3}	10^{-3}	3×10^{-4}	10^{-4}	3×10^{-5}	10^{-5}

05) Pour les stations situées à moins de 100 km de la mer, joindre une carte indiquant l'emplacement de l'antenne par rapport à la côte

Instructions pour remplir la fiche de description des stations réceptrices (O.km-O.hm)

1. Nom de la station réceptrice

Indiquer le nom de la localité sous lequel la station est connue ou dans laquelle elle est située. Limiter le nombre de lettres et de chiffres à un maximum de quatorze.

2. Pays

Indiquer le pays où la station est située. Utiliser à cet effet les symboles du Tableau N° 1 de la Préface de la Liste internationale des fréquences (dernière édition, ainsi que le dernier supplément récapitulatif).

3. Coordonnées de l'emplacement de l'antenne

Indiquer les coordonnées géographiques de l'emplacement de l'antenne de réception (longitude et latitude, en degrés et minutes).

4. Conductivité du sol avoisinant

Indiquer les renseignements les plus détaillés possible, relatifs à la conductivité moyenne du sol avoisinant. Les valeurs utilisées devront de préférence être arrondies aux valeurs qui figurent ci-dessous:

3×10^{-2}, 10^{-2}, 3×10^{-3}, 10^{-3},
3×10^{-4}, 10^{-4}, 3×10^{-5}, 10^{-5} (en S/m).

Mettre une croix dans la case appropriée.

5. Stations situées à moins de 100 km de la mer

Si la station est située à moins de 100 km de la mer, joindre une carte (au moins à l'échelle 1/1 000 000) en indiquant l'emplacement de l'antenne ainsi que l'échelle de la carte et la direction du Nord géographique.

ANNEXE III

FICHE DE DESCRIPTION DES STATIONS ÉMETTRICES (O.km - O.hm)
(voir instructions détaillées)

Station d'émission			
01) Nom	02) Pays	03) Coordonnées géographiques de l'antenne	
		Longitude (degrés et minutes)	Latitude (degrés et minutes)
		E O	N S

04) Fréquence porteuse		05) Puissance de l'onde porteuse P_c (kW)		06) Horaire de fonctionnement				
	kHz		kW	de		à		UTC

07) Conductivité du sol avoisinant (S/m)							
2	3	4	5	6	7	8	9
3×10^{-2}	10^{-2}	3×10^{-3}	10^{-3}	3×10^{-4}	10^{-4}	3×10^{-5}	10^{-5}

Caractéristiques de l'antenne				
Antenne verticale simple	Antenne autre qu'une antenne verticale simple			
	10) Joindre les diagrammes de directivité dans les plans horizontal et/ou vertical			
08) Hauteur (mètres)	11) Plan horizontal	a) azimut du rayonnement maximal (degrés)	b) largeur du lobe principal (degrés)	c) gain (en dB)
09) Gain (dB)	12) Plan vertical	a) angle de site du rayonnement maximal (degrés) si différent de zéro	b) largeur du lobe principal (degrés)	c) gain (en dB)

13) Pour les stations situées à moins de 100 km de la mer, joindre une carte indiquant l'emplacement de l'antenne par rapport à la côte

14) Réseau synchronisé	Nombre total de stations:
Si la station fait partie d'un réseau synchronisé, énumérer ci-dessous les autres stations faisant partie de ce réseau (si nécessaire, continuer au verso) et remplir une fiche séparée pour chacune de ces stations	
Nom de la station	Nom de la station

Instructions pour remplir la fiche de description des stations émettrices (O.km-O.hm)

1. Nom de la station émettrice

Indiquer le nom de la localité sous lequel la station est connue ou dans laquelle elle est située. Indiquer le nom tel qu'il figure dans la Liste internationale des fréquences, s'il y figure. Limiter le nombre de lettres et de chiffres à un maximum de quatorze.

2. Pays

Indiquer le pays où la station est située. Utiliser à cet effet les symboles du Tableau N° 1 de la Préface à la Liste internationale des fréquences (dernière édition, ainsi que le dernier supplément récapitulatif).

3. Coordonnées de l'emplacement de l'antenne

Indiquer les coordonnées géographiques de l'emplacement de l'antenne d'émission (longitude et latitude, en degrés et minutes).

4. Fréquence porteuse

Indiquer la fréquence porteuse de l'émetteur (en kHz).

5. Puissance de l'onde porteuse

Indiquer la puissance fournie à la ligne d'alimentation de l'antenne par l'émetteur, telle qu'elle est définie au numéro 153 du Règlement des radiocommunications. La dernière position de cette case est réservée à une décimale.

6. Horaire de fonctionnement

Utiliser une fiche séparée pour chaque période d'émission s'il y en a plusieurs au cours d'une journée. Indiquer l'horaire quotidien du fonctionnement de l'émetteur (en UTC), en heures et en minutes. Le premier groupe de chiffres indiquera l'heure du début de l'émission faisant l'objet de la fiche et le deuxième groupe de chiffres l'heure de la fin de cette émission.

Exemple:

de	0 8 3 0	à	1 6 3 0	UTC

7. Conductivité du sol avoisinant

Indiquer les renseignements les plus détaillés possible, relatifs à la conductivité moyenne du sol au voisinage de l'émetteur. Les valeurs utilisées devront de préférence être arrondies aux valeurs qui figurent ci-dessous:

3×10^{-2}, 10^{-2}, 3×10^{-3}, 10^{-3},
3×10^{-4}, 10^{-4}, 3×10^{-5}, 10^{-5} (en S/m).

Mettre une croix dans la case appropriée.

Caractéristiques de l'antenne

8. et 9. Antenne verticale simple

8. Indiquer la hauteur (en mètres) de l'antenne.

9. Indiquer le gain effectif (en dB) de l'antenne dans le plan horizontal par rapport au gain idéal (0 dB) d'une antenne verticale courte dans le plan horizontal.

Le rayonnement pouvant être exprimé indifféremment en puissance apparente rayonnée sur une antenne verticale courte (p.a.r.v.) ou en force cymomotrice (f.c.m.), il convient d'adopter pour définir le gain d'une antenne par rapport à une antenne verticale courte, dans une direction donnée, l'une des deux définitions suivantes:

– rapport entre la force cymomotrice (f.c.m.) de l'antenne considérée dans une direction donnée et la force cymomotrice (f.c.m.) dans le plan horizontal d'une antenne verticale courte sans perte placée sur un plan horizontal parfaitement conducteur, les deux antennes étant alimentées avec la même puissance;

– rapport entre la puissance nécessaire à l'entrée d'une antenne verticale courte sans perte placée sur un plan horizontal parfaitement conducteur pour produire une puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (p.a.r.v.) de 1 kW (ou une force cymomotrice de 300 V) dans une direction horizontale, et la puissance fournie à l'antenne considérée pour produire la même valeur de la puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (ou de la force cymomotrice) dans une direction donnée.

Ce rapport, exprimé en dB, est le même pour les deux définitions.

10. à 12. Antenne autre qu'une antenne verticale simple

10. Joindre au formulaire les diagrammes de directivité de l'antenne dans le plan horizontal et dans les plans verticaux, ou, si cela n'est pas possible, indiquer:

11. dans le plan horizontal:

a) l'azimut du rayonnement maximal, en degrés, à partir du Nord géographique, dans le sens des aiguilles d'une montre;

b) l'angle total en projection, en degrés, à l'intérieur duquel la puissance rayonnée dans une direction quelconque n'est pas inférieure de plus de 6 dB à la puissance rayonnée dans la direction du rayonnement maximal;

c) le gain, en dB (voir le § 9 ci-dessus);

12. dans le plan vertical:

a) l'angle de site, en degrés, de la direction du rayonnement maximal;

b) l'angle total, en degrés, à l'intérieur duquel la puissance rayonnée dans une direction quelconque n'est pas inférieure de plus de 6 dB à la puissance rayonnée dans la direction du rayonnement maximal;

c) le gain, en dB (voir le § 9 ci-dessus).

Lorsque le diagramme de l'antenne comporte des lobes secondaires importants, indiquer sur une feuille séparée, pour chaque lobe, l'azimut et l'angle de site de l'axe du lobe ainsi que le gain en dB.

13. Stations situées à moins de 100 km de la mer

Si la station est située à moins de 100 km de la mer, joindre une carte (au moins à l'échelle 1/1 000 000) indiquant l'emplacement de l'antenne ainsi que l'échelle de la carte et la direction du Nord géographique.

14. Réseau synchronisé

Si l'émetteur fait partie d'un réseau synchronisé, indiquer le nom des autres émetteurs du réseau. Il y aura lieu de remplir une feuille séparée pour chacune de ces stations.

VŒU 67

OBSERVATIONS GÉOPHYSIQUES ET SOLAIRES NÉCESSAIRES POUR LA PRÉVISION A COURT TERME DE LA PROPAGATION IONOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 27A/6)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que l'utilisation efficace des fréquences radioélectriques dépend de l'existence de données solaires et géophysiques mondiales les plus fiables possibles obtenues à l'aide d'observations effectuées au sol et par satellite,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU que les administrations s'efforcent par tous les moyens:

1. de faire des observations régulières (comme celles dont il est question dans les Rapports 727 et 888) dans le cadre des réseaux mondiaux en vue de fournir les données fondamentales nécessaires aux prévisions à court terme;

2. de mettre en place de nouvelles installations pour faire des observations dans les régions où il n'existe pas de réseau approprié de stations d'observation.

Note. – Le Directeur du CCIR est prié de transmettre ce texte, avec les Rapports 727 et 888, à l'Union radio-scientifique internationale (URSI), à l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), à l'Union astronomique internationale (UAI), au Comité spécial pour la physique Soleil-Terre (SCOSTEP) et au Comité pour la recherche spatiale (COSPAR), afin de recueillir les observations de ces organismes.

VŒU 68

BANQUE DE DONNÉES CONCERNANT LES MESURES DU CHAMP DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE DANS LA GAMME DES ONDES DÉCAMÉTRIQUES

(Programme d'études 30A/6)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que, si l'on veut contrôler la précision des méthodes d'évaluation du champ et en mettre au point de nouvelles, il faut disposer de résultats d'observation du champ de l'onde ionosphérique recueillis, dans la gamme des ondes décamétriques, dans des conditions normalisées, pour une grande variété de trajets et de conditions d'exploitation;

b) que le Rapport 253 indique de façon détaillée comment procéder aux observations et en présenter les résultats en vue d'obtenir des données normalisées présentant le maximum d'intérêt;

c) que le CCIR, par le Groupe de travail intérimaire 6/1, a établi une banque de données de mesure, mais que le contenu de cette banque est insuffisant pour le but recherché,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que les administrations et organisations fassent leur possible pour fournir au Directeur du CCIR, en vue de les inclure dans la banque de données, les résultats de mesures dont elles disposent;

2. qu'elles recueillent et fournissent de nouvelles données en se conformant aux procédures décrites en détail dans le Rapport 253;

3. que, bien que les données recueillies et fournies conformément au Rapport 253 soient préférables, les administrations et organisations qui disposent d'autres données soient encouragées à les fournir. La nature de ces données et la manière de les traiter devraient alors être expliquées de façon adéquate.

Note. – Voir aussi le Vœu 45.

VŒU 69

MESURES DE CHAMP AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 1,7 MHz ENVIRON

(Programme d'études 31D/6)

(1982)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que de nouvelles données sur la propagation aux fréquences inférieures à 1,7 MHz environ sont nécessaires,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

1. que les administrations et organisations qui ont la possibilité d'effectuer des mesures de champ et de phase, ou qui peuvent procéder à des émissions convenant à de telles mesures, soient encouragées à participer à des campagnes de mesures, particulièrement dans les parties du monde où l'on a fait peu de mesures;

2. que les administrations et les organisations communiquent leurs résultats au Directeur du CCIR. Dans la mesure du possible on utilisera pour cela les formulaires normalisés du Vœu 46.

VŒU 82

UTILISATION POUR LA PRÉVISION DE foF2 D'UN INDICE D'ACTIVITÉ SOLAIRE (IG) DÉDUIT D'OBSERVATIONS IONOSPHÉRIQUES

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le Rapport 340 contient des cartes et des données numériques complètes qui fournissent le moyen le plus répandu de prévoir la foF2 en fonction du nombre des taches solaires;

b) que les prévisions ainsi effectuées sont, dans certaines régions du monde et à certains moments (voir le Rapport 430), entachées d'erreurs excessives et qu'il serait avantageux, pour l'efficacité des communications, que l'on dispose d'un système de prévision donnant une meilleure précision;

c) qu'il a été proposé que l'indice IG [Liu et autres, 1983] déduit d'observations ionosphériques et obtenu indépendamment du nombre de taches solaires, soit utilisé avec les données contenues dans le Rapport 340;

Note. – Dans cet article, le nouvel indice appelé IG dans le présent document est appelé GESSN.

d) qu'il a été prouvé que l'on peut utilement améliorer les prévisions de foF2 si l'on utilise l'indice IG_{12} à la place de l'indice R_{12};

e) que l'on dispose des valeurs mensuelles de l'indice IG pour les 40 dernières années et que l'on fait actuellement des prévisions des valeurs futures de IG_{12} en appliquant la même méthode que pour les prévisions de R_{12} (voir la Recommandation 371);

f) que les valeurs prévues de l'indice IG_{12} pour tout un cycle solaire sont disponibles auprès du Secrétariat du CCIR,

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU

que le «Science and Engineering Research Council» du Royaume-Uni soit encouragé à poursuivre les prévisions de l'indice IG_{12} pour l'évaluation de la foF2 et à en communiquer les résultats au Directeur du CCIR à l'intention des administrations et organisations qui désirent les utiliser.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LIU, R. Y., SMITH, P. A. et KING, J. W. [1983] Un nouvel indice solaire dont l'utilisation améliore les prévisions de foF2 fondées sur l'Atlas du CCIR. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, **VIII**, 408-414.

VŒU 85*

MESURES DES CARACTÉRISTIQUES DU BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ATMOSPHÉRIQUE

(1986)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'intensité du bruit radioélectrique atmosphérique limite la qualité de fonctionnement des circuits radioélectriques fonctionnant à des fréquences inférieures à environ 30 MHz;

b) que les renseignements contenus dans le Rapport 322-2 (Genève, 1982) sont utilisés depuis longtemps comme élément de planification des services de radiocommunication;

c) que le Rapport 322-3 fournit de nouveaux renseignements sur les caractéristiques du bruit radioélectrique atmosphérique qui, dans certaines parties du monde, diffèrent considérablement des données indiquées dans la version précédente du Rapport;

d) que de nouvelles études sont nécessaires comme indiqué en détail dans le Programme d'études 29B/6,

---

* Ce Vœu doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 3, 7, 8 et 10.

ÉMET A L'UNANIMITÉ LE VŒU que les administrations et exploitations privées reconnues s'emploient:

1. à faire des mesures de l'intensité et d'autres caractéristiques du bruit radioélectrique atmosphérique en tenant compte de la nécessité de distinguer le bruit naturel du bruit artificiel;

2. à analyser les résultats des mesures du bruit radioélectrique atmosphérique sur la base des paramètres utilisés dans le Rapport 322 de manière à faciliter la comparaison;

3. à évaluer les effets pratiques de l'application des renseignements du Rapport 322 à la planification des systèmes de radiocommunication.

DÉCISION 6-5

CHAMP ET AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE POUR LES FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 1,6 MHz

(Programme d'études 30A/6)

(1956-1959-1963-1966-1970-1974-1976-1978-1981-1983-1985)

La Commission d'études 6 du CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le Groupe de travail intérimaire 6/1 a mis au point une méthode provisoire d'estimation du champ de l'onde ionosphérique et de l'affaiblissement de transmission adaptée à l'usage d'ordinateurs (Rapport 252-2, New Delhi, 1970) ainsi qu'une deuxième méthode provisoire (Supplément au Rapport 252-2);

b) qu'il est souhaitable d'opter pour la méthode la mieux adaptée aux besoins du CCIR;

c) que la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décamétriques attribuées au service de radiodiffusion (HFBC(1)) a décidé d'adopter une méthode de prévision de la propagation de l'onde ionosphérique tirée de celle du Rapport 894;

d) qu'il est nécessaire de mettre au point une méthode qui soit aussi simple que possible et qui réponde aux normes de précision exigées dans la pratique,

DÉCIDE

1. de maintenir le GTI 6/1, avec le mandat suivant:

- apporter les améliorations et les simplifications souhaitables aux méthodes d'estimation du champ et de l'affaiblissement de transmission de l'onde ionosphérique;
- contrôler les prévisions établies d'après les méthodes dont dispose le CCIR en les comparant au plus grand nombre possible de mesures de champ, afin de déterminer les progrès pratiques accomplis grâce à la deuxième méthode provisoire, et soumettre les résultats de ces comparaisons à la prochaine réunion de la Commission d'études 6;
- mettre au point des méthodes de prévision adaptées aux ordinateurs personnels et à des moyens de calcul plus simples (voir la Note 1);
- collaborer avec les administrations et les organisations internationales, en les aidant à faire des prévisions de champ relatives aux circuits qu'elles étudient, soit par les méthodes du CCIR, soit par toute autre méthode;
- collaborer avec le Secrétariat du CCIR pour la coordination des Banques de données concernant les mesures du champ de l'onde ionosphérique dans la gamme des ondes décamétriques (Vœu 68);

2. que le GTI 6/1 soit composé selon les indications de l'Annexe I;

3. que le Directeur du CCIR communiquera au Rapporteur principal et au Vice-Rapporteur principal de la Commission d'études 6, ainsi qu'au Président du GTI 6/1, tous changements à l'Annexe I dont il pourrait avoir connaissance, sans que ces changements soient considérés comme des modifications à la présente Décision;

4. que le GTI 6/1 présentera ses conclusions à la prochaine réunion de la Commission d'études 6 et, en particulier, qu'il proposera des nouveaux textes du CCIR ou des modifications aux textes existants, conformément à son mandat.

Note 1. – La priorité sera donnée à la mise au point de la méthode de prévision la plus précise fondée sur l'utilisation de micro-ordinateurs (Rapport 1013).

ANNEXE I

Liste des participants au GTI 6/1:

Président:

M. P. A. Bradley (Royaume-Uni),
Rutherford-Appleton Laboratory
Chilton
Didcot
Oxfordshire, OX11 OQX
Royaume-Uni

Administrations:

Allemagne (République fédérale d')
Argentine
Australie
Brésil
Chili
Chine (République populaire de)
Cuba
Etats-Unis d'Amérique
Finlande
France
Inde
Iran (République islamique d')
Japon
Qatar
Royaume-Uni
URSS
Yougoslavie (République socialiste fédérative de)

Union internationale des télécommunications:

IFRB

DÉCISION 9-4

PROPAGATION DE L'ONDE IONOSPHÉRIQUE ET QUALITÉ DE FONCTIONNEMENT DES CIRCUITS AUX FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 500 kHz ENVIRON

(Programme d'études 31D/6)

(1963-1966-1970-1974-1976-1978-1981-1985)

La Commission d'études 6 du CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le GTI 6/5 a mis au point des méthodes d'évaluation du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences inférieures à environ 500 kHz (Rapports 265 et 895) alors que le GTI 6/4 élaborait des méthodes différentes pour évaluer le champ de l'onde ionosphérique dans la bande de fréquences 150-1705 kHz (Rapport 575);

b) que, si les méthodes indiquées dans ces Rapports sont en gros conçues pour être applicables dans les diverses régions du monde, il est vraisemblable que leur précision pourrait être améliorée pour des applications particulières dans certaines régions du fait qu'elles sont largement basées sur des observations réalisées dans la Région Europe-Asie de l'UIT;

c) que les autres méthodes de calcul du champ devraient concorder lorsque fréquences et distances sont les mêmes,

DÉCIDE

1. de maintenir le Groupe de travail intérimaire 6/5 avec le mandat suivant:

– comparer les méthodes de prévision du champ qui figurent dans les Rapports 575 et 265 pour des trajets, fréquences, distances et emplacements géographiques déterminés lorsque l'on dispose de mesures récentes du champ en ondes kilométriques (30-300 kHz);

– comparer les valeurs du champ prévues et mesurées;
– proposer des modifications aux méthodes existantes pour qu'il puisse, si possible, y avoir une meilleure concordance entre les résultats obtenus et les valeurs mesurées du champ;

2. que le GTI 6/5 sera composé selon les indications de l'Annexe I. Cependant, les administrations que cette étude intéresse devraient être encouragées à participer aux travaux;

3. que le Directeur du CCIR communiquera au Rapporteur principal et au Vice-Rapporteur principal de la Commission d'études 6, ainsi qu'au Président du GTI 6/5, tous changements à l'Annexe I dont il pourrait avoir connaissance, sans que ces changements soient considérés comme des modifications à la présente Décision;

4. que le GTI 6/5 présentera ses conclusions à la prochaine réunion de la Commission d'études 6 et, en particulier, qu'il proposera de nouveaux textes du CCIR ou des modifications aux textes existants, conformément à son mandat.

ANNEXE I

Liste des participants au GTI 6/5:

Président:

Dr J. Belrose (Canada)
Communications Research Centre
Department of Communications
Shirley Bay
P.O. Box 11490, Station H
Ottawa, Ontario K2H 8S2
Canada

Administrations:

Australie
Canada
Etats-Unis d'Amérique
Japon
Royaume-Uni

DÉCISION 10-5

CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATION POUR LES CIRCUITS RADIOÉLECTRIQUES IONOSPHÉRIQUES

(Question 27/6)

(1970-1974-1976-1978-1980-1981-1985)

La Commission d'études 6 du CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que l'on a besoin de renseignements relatifs aux possibilités de prévisions à court terme et d'estimations en temps réel de caractéristiques *d'exploitation* pour les circuits radioélectriques ionosphériques;

b) qu'il y a lieu de maintenir une coopération particulière entre la Commission d'études 6 et les Commissions d'études qui s'occupent des services, notamment pour le service fixe, la radiodiffusion et les services mobiles, afin de connaître les besoins particuliers de différents circuits radioélectriques en matière de prévisions à court terme et d'estimations en temps réel,

DÉCIDE

1. de maintenir le Groupe de travail intérimaire 6/7, avec le mandat suivant:
– étudier les possibilités de prévisions à court terme et d'estimations en temps réel de caractéristiques *d'exploitation* pour les circuits radioélectriques ionosphériques;
– étudier les techniques d'évaluation en temps réel des voies pouvant faciliter les prévisions à court terme;
– étudier les problèmes particuliers associés aux prévisions à court terme aux latitudes élevées;
– étudier les possibilités de gestion des fréquences d'exploitation pour les circuits radioélectriques ionosphériques;

2. que le GTI 6/7 soit composé selon les indications de l'Annexe I;

3. que toute autre administration ou organisation participant aux travaux de la Comission d'études 6 qui désirerait s'associer aux travaux du Groupe de travail intérimaire 6/7 devra faire connaître au Directeur du CCIR le nom et l'adresse de l'expert qu'elle aura désigné;

4. que le Directeur du CCIR communiquera au Rapporteur principal et au Vice-Rapporteur principal de la Commission d'études 6, ainsi qu'au Président du GTI 6/7, tous changements à l'Annexe I dont il pourrait avoir connaissance, sans que ces changements soient considérés comme des modifications à la présente Décision;

5. que le GTI 6/7 présentera ses conclusions à la prochaine réunion de la Commission d'études 6 et, en particulier, qu'il proposera des nouveaux textes du CCIR ou des modifications aux textes existants, conformément à son mandat.

ANNEXE I

Liste des participants au GTI 6/7:

Président:

M. L. F. McNamara (Australie)
Andrew Antennas
Suite 1, 1st floor
Innovation House
The Levels, S 5095
Australie

Administrations:

Allemagne (République fédérale d')
Argentine
Australie
Etats-Unis d'Amérique
France
Inde
Japon
Pays-Bas
Royaume-Uni
URSS
Yougoslavie (République socialiste fédérative de)

DÉCISION 11-5

PROPAGATION DES ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES PAR L'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E ET PAR D'AUTRES RÉGIONS DE L'IONOSPHÈRE

(Programme d'études 30B/6)

(1970-1974-1976-1978-1981-1983-1985)

La Commission d'études 6 du CCIR,

CONSIDÉRANT

que la propagation des ondes métriques et décimétriques par l'ionisation sporadique de la région E et par d'autres régions de l'ionosphère est souvent responsable de sérieux brouillages causés à la radiodiffusion sonore et visuelle, aux services mobiles et aux systèmes utilisant la diffusion troposphérique ou ionosphérique et que, si l'on néglige d'en tenir compte, on risque de s'exposer à de sérieuses erreurs dans l'estimation de la fiabilité d'un système,

DÉCIDE

1. de maintenir le Groupe de travail intérimaire 6/8, avec le mandat suivant:

- étudier les questions relatives à la propagation des ondes métriques et décimétriques par l'ionisation sporadique de la région E et par d'autres régions naturelles de l'ionosphère;
- améliorer la méthode actuellement appliquée pour estimer le champ ou l'affaiblissement de transmission des ondes métriques résultant de la propagation par des réflexions dues à l'ionisation sporadique de la région E en insistant sur l'étude de foEs dans la zone équatoriale, la zone tempérée australe et les zones aurorales;

– élaborer des méthodes permettant d'estimer le champ ou l'affaiblissement de transmission des ondes métriques et décimétriques résultant de la propagation par des réflexions dues à l'ionisation sporadique de la région E et par des réflexions sur la région F;

2. que le GTI 6/8 soit composé selon les indications de l'Annexe I;

3. que toute autre administration ou organisation participant aux travaux de la Commission d'études 6 qui désirerait prendre part aux travaux de ce Groupe devra indiquer au Directeur du CCIR le nom et l'adresse de l'expert qu'elle désigne à cet effet;

4. que le Directeur du CCIR communiquera au Rapporteur principal et au Vice-Rapporteur principal de la Commission d'études 6, ainsi qu'au Président du GTI 6/8, tous changements à l'Annexe I dont il pourrait avoir connaissance, sans que ces changements soient considérés comme des modifications à la présente Décision;

5. que le GTI 6/8 présentera ses conclusions à la prochaine réunion de la Commission d'études 6 et, en particulier, qu'il proposera des nouveaux textes du CCIR ou des modifications aux textes existants, conformément à son mandat.

ANNEXE I

Liste des participants au GTI 6/8:

Président:

Dr Alberto Giráldez (Argentine)
Laboratorio Ionosférico de la
Armada Argentina (LIARA)
Avenida Libertador N° 327
1638 Vicente Lopez
Buenos Aires
Argentine

Administrations:

Allemagne (République fédérale d')
Argentine
Australie
Brésil
Etats-Unis d'Amérique
Inde
Japon
Nigéria
Royaume-Uni
Suède
URSS

Organisations internationales:

Union européenne de radiodiffusion (UER)
Union internationale des radioamateurs (IARU)

DÉCISION 57-1

ANALYSE DES MÉTHODES DE PRÉVISION DE LA PROPAGATION A UTILISER EN RELATION AVEC LA RADIODIFFUSION A ONDES HECTOMÉTRIQUES, POUR APPLICATION DANS LA RÉGION 2 DE L'UIT

(1983-1985)

La Commission d'études 6 du CCIR,

CONSIDÉRANT

a) que le Rapport 575 et la Recommandation 435 du CCIR décrivent les méthodes de calcul du champ de l'onde ionosphérique aux fréquences de la bande des ondes hectométriques;

b) que, bien que les méthodes du Rapport 575 et de la Recommandation 435 soient destinées à être appliquées sur une large échelle dans les diverses régions géographiques du monde, il est possible que, moyennant quelque révision, on puisse améliorer leur précision et leur utilité en vue de leur application spécifique à la planification de la radiodiffusion à ondes hectométriques dans la Région 2, et qu'une autre méthode pourrait être nécessaire;

c) que la Recommandation 504 de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (Genève, 1979) prévoit qu'une Conférence administrative régionale des radiocommunications sera convoquée en vue d'établir un plan pour le service dans la bande 1605-1705 kHz dans la Région 2 et que les deux sessions de cette Conférence sont prévues respectivement pour 1986 et 1988;

d) que la Conférence administrative régionale de radiodiffusion à ondes décamétriques (Région 2), Rio de Janeiro, 1981, a invité le CCIR à effectuer les études techniques nécessaires pour permettre une planification satisfaisante de la bande 1605-1705 kHz;

e) que plusieurs administrations de la Région 2 ont récemment entrepris des projets de mesure de l'onde ionosphérique à long terme et qu'on peut en attendre un volume d'information considérable,

DÉCIDE

1. de conserver le Groupe de travail intérimaire 6/4, avec le mandat suivant:

- analyser les méthodes existantes de prévision du champ et comparer ces méthodes avec les données recueillies dans la Région 2;
- effectuer les études énumérées dans le Programme d'études 31C-2/6;
- étudier plus avant les méthodes existantes et proposer d'y apporter, le cas échéant, des modifications, pour les besoins de la planification dans la Région 2;
- collaborer avec les administrations, les organisations internationales et le Secrétariat du CCIR à l'établissement et à la coordination de la Banque de données des mesures du champ de l'onde ionosphérique dans la bande des ondes hectométriques (voir le Vœu 46);

2. que le GTI 6/4 présentera un rapport à la prochaine réunion de la Commission d'études 6; en particulier, il proposera de nouveaux textes du CCIR et/ou des modifications aux textes existants qui concernent son mandat;

3. que le GTI 6/4 sera composé selon les indications de l'Annexe I;

4. que le Directeur du CCIR communiquera au Rapporteur principal et au Vice-Rapporteur principal de la Commission d'études 6, ainsi qu'au Président du GTI 6/4, tous changements à l'Annexe I dont il pourrait avoir connaissance, sans que ces changements soient considérés comme des modifications à la présente Décision.

ANNEXE I

Liste des participants au GTI 6/4:

Président:

M. J. C. H. Wang (Etats-Unis d'Amérique)
Federal Communications Commission
2025 M Street, NW
Washington, DC 20554
Etats-Unis d'Amérique

Administrations:

Argentine
Brésil
Canada
Cuba
Etats-Unis d'Amérique
Inde
Italie
Mexique
Royaume-Uni

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INDEX ALPHABÉTIQUE DES TERMES (MOTS CLÉS) DU VOLUME VI

A

Absorption (R.252, Sup.R.252, R.263, R.574, R.725, R.727, R.729, R.886, R.893)
- augmentation de l'absorption après les orages géomagnétiques (R.886)
- aurorale (R.252, Sup.R.252, R.263, R.729, R.886)
- calotte polaire (R.263, R.725, R.727, R.886)
- et transmodulation (R.574)
- ionosphérique (R.263, R.729, R.893)

Absorption avec déviation et sans déviation (R.252)

Affaiblissement d'espace libre (R.252, Sup.R.252)

Affaiblissement de transmission (Rec.533, R.252, Sup.R.252, R.729)

Affaiblissement de transmission de référence (R.251, R.252, Sup.R.252)

Affaiblissement du système (R.252, Sup.R.252)

Affaiblissement par couplage de polarisation (Rec.435, Sup.R.252, R.575, R.729, R.1015)

Affaiblissement par étalement (R.729)

Affaiblissement spatial (R.252)

Affaiblissement supplémentaire dû au couplage de polarisation (voir aussi Affaiblissement par couplage de polarisation)

Alerte géophysique (Rec.313)

Angle d'arrivée (R.263, R.266)
- diversité (R.266)

Angle zénithal de la projection du rayon oblique (R.252)

Anomalie diurne (R.725)

Anomalie saisonnière (R.725)

Antenne équivalente sans pertes (R.322)

Antennes (Rec.435, R.252, R.253, R.265, R.435, R.575, R.729, R.891, R.1014)
- caractéristiques (R.891)
- facteur (R.265, R.891)
- gain (Rec.435, R.252, R.575, R.729, R.1014)
- ouverture (R.891)
- pour les mesures de champ (R.253)

Atlas des caractéristiques ionosphériques (Rec.434, R.340)

Atmosphériques (R.254) (voir aussi Bruit radioélectrique)

Aurorale, région (R.252, Sup.R.252, R.263, R.725, R.726, R.727, R.729, R.886)
- absorption (R.252, Sup.R.252, R.263, R.729, R.886)
- échos (R.726, R.886)
- indice d'électrojet (AE) (R.727, R.886)
- ovale (R.886)
- sous-orages (R.725)
- zone (R.886)

Autofocalisation thermique (R.893)

Avertissements de perturbations ionosphériques (Rec.313)

B

Banques de données (R.253, R.571, Rs.63)

Banques de données du CCIR (R.253, R.571, Rs.63)

Brouillage d'origine terrestre en ondes décamétriques (R.342)

Brouillage entre symboles (R.889)

Bruit atmosphérique radioélectrique (R.254, R.322)
- caractéristiques (R.322)
- mesures (R.254, R.322)

Bruit cosmique (R.342)

Bruit extragalactique (R.342)

Bruit galactique (R.322, R.342)

Bruit radioélectrique (Rec.372, R.254, R.258, R.266, R.322, R.342, V.85)
- bruit dans l'ionosphère et au-delà (R.342)
- caractéristiques (Rec.372, R.258, R.266, R.322, R.342)
- engendré par les éclairs (R.254)
- enregistrement (R.322)
- mesures (R.342)
- utilisation des données (Rec.372, V.85)

Bruit radioélectrique artificiel (R.258)
- caractéristiques (R.258)
- mesures (R.258)

C

Calotte polaire (R.260, R.263, R.725, R.727, R.886)
- absorption (R.263, R.725, R.727, R.886)
- cavité polaire (R.725)
- région de (R.260, R.727)

Canaux (R.889)
- évaluation en temps réel (RTCE) (R.889)
- évaluation et appel, système de sondage (R.889)
- fonction de propagation (R.889)
- qualité, facteurs affectant la (R.889)

Cartographie ionosphérique (R.340, R.430)

Centres mondiaux de données (R.253)

Centres régionaux d'avertissement (Rec.313)

Champ (Rec.435, Rec.533, Rec.534, R.252, Sup.R.252, R.253, R.259, R.265, R.431, R.432, R.575, R.729, R.894, R.895, R.1014, R.1015)
- à 500 kHz vers les aéronefs (R.1015)
- calculs des modes mixtes (R.252, Sup.R.252)
- couche E sporadique (Rec.534, R.259)
- fréquences entre 150 et 1600 kHz (Rec.435, R.431, R.432, R.575)
- fréquences entre 30 et 500 kHz (R.265)
- fréquences entre 2 et 30 MHz (Rec.533, R.252, Sup.R.252, R.729, R.894)
- fréquences inférieures à 30 kHz (R.895)
- mesures (R.253, R.431, R.432)
- radiodiffusion dans la Région 2 dans la bande 1605-1705 kHz (R.1014)
- variations (R.252, Sup.R.252, R.431, R.432, R.575, R.894)

Coefficient d'affaiblissement horaire (Rec.435, R.575, R.1015)

Coefficient de pertes (Rec.435, R.1015)

Coefficient de pertes de référence (Rec.435, R.575)

Collision des électrons (R.574, R.725)

Comptage d'erreurs, techniques (RTCE) (R.889)

Compteur d'éclairs, observations (R.254)

Contenu électronique total (CET) (R.263, R.430, R.725, R.727, R.888)
- mesures (R.430, R.725)
- prévisions à court terme (R.888)

Contrôle des fréquences (R.889)

Corrélation des signaux (R.266)

Couche E sporadique (Rec.534, R.249, R.250, R.252, Sup.R.252, R.259, R.262, R.725, R.886, R.888, R.889, R.890)
affaiblissement d'occultation (Sup.R.252)
affaiblissement par réflexion (Sup.R.252)
calcul du champ (Rec.534)
ionisation (R.259)
probabilité d'occurrence (Rec.534, R.259)
variations (R.259)
zones équatoriale, tempérée et aurorale (R.259)

Couplage des ondes (R.250)

Courbes du Caire (R.575, R.1014)

D

Décile inférieur (R.892)

Déciles supérieur et inférieur (R.258, R.266, R.892)

Densité électronique (Rec.434, R.250, R.252, R.340, R.430, R.725, R.728, R.887, R.893)
fluctuations (R.887)
irrégularités (R.893)
mesures (R.430)

Diffusion ambipolaire, constante (R.251)

Diffusion B.dam à B.dm (R.886)

Diffusion dans l'ionosphère (R.259, R.260, R.726, R.728, R.729, R.886)

Diffusion latérale (R.260, R.726, R.890)

Direction de propagation par rapport à est-ouest magnétique (Rec.435)

Direction de propagation par rapport au champ magnétique terrestre (R.895)

Directivité des antennes (R.891)

Dispersion (R.263)

Dispersion du temps (R.889)

Dispersion fréquentielle (R.889)

Disponibilité de mode (défin.) (R.892)

Disponibilité de mode (Sup.R.252, R.892)

Distance de saut, cartographie (R.890)

Distribution de la concentration électronique en fonction de la hauteur, modèle de (R.729)

Distribution des météores (R.251)

Distributions statistiques (de l'amplitude du signal reçu) (R.266)

Diversité d'espace (R.263, R.266)

Diversité de fréquence (R.266)

Diversité de polarisation (R.266)

Diversité de temps (R.263, R.266)

Diversité, réception en (R.263, R.266)

Doppler, effet (R.263, R.266, R.889)
étalement en fréquences (R.266, R.889)
facteur de réduction (R.266)
propagation Terre-espace (R.263)

E

Echauffement des électrons (R.728, R.893)

Echos tour-du-monde (RTW) (R.250)

Emissions de grande puissance (Rec.532, R.728, R.893)

Engins spatiaux, effets ionosphériques (Rec.531)

Enregistrement des mesures de champ, techniques (R.253)

Eruptions à protons (R.727)

Evaluation des canaux en temps réel (RTCE) (R.889)

Evanouissements (Sup.R.252, R.263, R.266, R.431, R.729, R.886)
caractéristiques (R.266)
fréquence (R.431)
marge entre (Sup.R.252, R.266)

Evanouissements sélectifs (R.266)

Evanouissements sur ondes courtes (R.727)

Evénements brusques (R.260, R.727, R.886)
absorption brusque du bruit cosmique (R.727)
anomalies de phase (R.727)
perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB) (R.260, R.727, R.886)

Evénements solaires (Rec.371, R.252, R.340, R.342, R.727, R.886, R.887, R.888)
angle zénithal (R.340)
bruit (R.342)
couronne (R.887)
déclinaison (R.252)
éruptions (R.727, R.887, R.888)
événements à protons (R.886)
flux de bruit radioélectrique (Rec.371, R.727, R.888)
indices (voir Propagation ionosphérique, considérations relatives à la, indices)
magnétogrammes (R.727)
observations (R.727)
vent (R.727, R.887, R.888)

Evénements transéquatoriaux (R.259, R.895)
anomalies sur trajets transéquatoriaux (R.895)
propagation transéquatoriale (R.259)

F

Facteur d'activité solaire (Rec.435)

Facteur d'étalement (R.266)

Facteur de bruit de fonctionnement d'un système de réception (R.322)

Facteur de bruit de la ligne de transmission (R.322)

Facteur de bruit du récepteur (R.322)

Facteur de bruit équivalent d'antenne (R.322)

Facteur de focalisation (R.265)

F-diffus (Rec.434)

Fiabilité de circuit (défin.) (R.892)

Fiabilité de circuit (R.729, R.892, R.894)
estimation (R.729, R.894)

Fiabilité de mode (défin.) (R.892)

Fiabilité de réception (défin.) (R.892)

Fiabilité de service (défin.) (R.892)

Fiabilité des systèmes radioélectriques en B.dam (R.892)

Force cymomotrice (Rec.435, R.1014, R.1015)

FOT (voir Fréquence optimale de travail)

Fréquence maximale de transmission (MUF) (défin.) (Rec.373)

Fréquence maximale de transmission (MUF) (Rec.373, R.252, Sup.R.252, R.340, R.729, R.894)
détermination (R.252, Sup.R.252, R.340, R.729, R.894)

Fréquence maximale observée (MOF) (R.249)

Fréquence minimale observée (LOF) (R.249, R.727)

Fréquence minimale utilisable (LUF) (Rec.313, R.252, Sup.R.252, R.727, R.894)

Fréquence optimale de travail (OWF ou FOT) (défin.) (Rec.373)

Fréquence optimale de travail (OWF ou FOT) (Rec.373, R.889)
détermination (R.889)

Fréquences critiques (R.252, Sup.R.252, R.340, R.888)

G

Gain de focalisation (Sup.R.252)

Gain des antennes (R.891)

Gain dû à la mer (Rec.435, R.891, R.1014, R.1015)

Galerie des chuchotements, mode (ou mode à deux parois) (R.250)

Gestion des fréquences (R.889)

Groupe consultatif du réseau ionosphérique (INAG) (voir sous INAG)

Guidage (R.250, R.262)

Guide inhomogène aux fréquences inférieures à 30 kHz (R.895)

Guide sphérique homogène aux fréquences inférieures à 30 kHz (R.895)

Gyrofréquence des électrons (R.342)

H

Hauteur virtuelle de réflexion (R.340)

Hauteur virtuelle de réflexion (Sup.R.252, R.340)

Heure de référence (Rec.435, R.575, R.1015)

I

INAG (Groupe consultatif du réseau ionosphérique) (R.255, R.430)

Inclinaison magnétique (Rec.435, R.252, Sup.R.252)

Inclinaison magnétique modifiée (R.252)

Indice magnétique (R.252)

Indices (Rec.371)
- indice d'activité solaire déduit d'observations ionosphériques IG (Rec.371)
- indice de bruit solaire Φ (Rec.371)
- nombres de taches solaires (Rec.371)

Injections de produits chimiques (R.1011)

Intensité des signaux, comparaison entre valeurs observées et calculées (R.571)

Ionisation alignée (R.250)

Ionisation anormale (R.259)

Ionisation météorique (R.259)

Ionisation, sources (R.725)

Ionisation, taux de production (R.725)

Ionosondes (R.430, R.725, R.889)
- caractéristiques (R.430, R.725)
- en contre-haut (R.725)
- incidence oblique (R.889)

Ionosphère (Rec.434, Rec.532, Rec.552, R.263, R.342, R.430, R.725, R.728, R.886, R.1011)
- bruit dans l'ionosphère et au-delà (R.342)
- caractéristiques (Rec.434, R.725)
- équatoriale (R.263)
- latitudes élevées (R.886)
- modification de l'ionosphère par injections de produits chimiques (R.1011)
- modifications par émissions de grande puissance (Rec.532, R.728)
- programme d'observations pour cartographie numérique (R.430)

Ionosphère planétaire et magnétosphère (R.887)

Irrégularités alignées avec le champ (R.893)

IUWDS (Service international des Ursigrammes et Jours mondiaux) (Rec.313, R.727)

L

Latitude géomagnétique corrigée (Sup.R.252, R. 886)

LOF (voir Fréquence minimale observée)

Longueur du chemin parcouru par l'onde (Rec.435, R.575, R.1015)

Longueur du trajet, détermination (R.252, R.340)

LUF (voir Fréquence minimale utilisable)

M

Magnétosphère (R.342, R.725, R.886)
- bruit magnétosphérique (R.342)
- événements dans la (R.886)
- sous-orage (R.725)

Mesure des conditions de propagation (R.253, R.431, R.571)

Mesures en ondes continues (de 150 à 1600 kHz) (R.431)

Mesures par impulsions, 150 à 1600 kHz (R.431)

Méthode de recherche des modes, fréquences inférieures à 30 kHz (R.895)

Méthodes des «bonds» (R.265, R.575)
- fréquences entre 150 et 1600 kHz (R.575)
- fréquences entre 30 et 500 kHz (R.265)

Méthodes fondées sur l'utilisation de micro-ordinateurs pour l'évaluation des conditions de la propagation des ondes décamétriques et de la qualité de fonctionnement des circuits (R.1013)

Minne, formule de (R.575)

Mode à deux parois (ou par «galerie des chuchotements») (R.250)

Mode du guide d'onde (R.265, R.886)

Modes de propagation guidée et de propagation selon une corde (R.250)

Modes mixtes, calculs (R.252, Sup.R.252)

Modèle du champ magnétique (R.340)

Modification de l'ionosphère (voir Ionosphère)

MOF (voir Fréquence maximale observée)

Moyenne glissante du nombre de taches solaires R12 (voir Taches solaires, nombres)

MUF (voir Fréquence maximale de transmission)

MUF classique (Rec.373)

MUF d'exploitation (défin.) (Rec.373)

MUF d'exploitation (Rec.313, Rec.373, R.255, R.340, R.888)
- prévision à court terme (R.888)

MUF de référence (défin.) (Rec.373)

MUF de référence (Rec.373, R.249, Rec.434, R.252, Sup.R.252, R.255, R.340, R.727, R.889, R.890, R.894)
- focalisation (R.249)
- prévisions (R.252, Sup.R.252, R.255, R.340, R.894)

MUF normalisée (Rec.373)

O

Observations par satellite (R.250, R.254, R.262, R.342, R.430, R.725, R.727, R.887, R.888)

OMEGA, système de navigation (R.895)

Onde extraordinaire (Rec.373, R.252)

Onde ordinaire (Sup.R.252)

Ondes électrostatiques (R.342)

Orages, distribution mondiale (R.254)

Orages ionosphériques (R.725, R.727, R.886, R.889)

Orages ionosphériques géomagnétiques (R.727, R.888)

Orages magnétiques (R.886)

Orages récurrents (R.727)

Ouverture d'antenne (R.891)

OWF (voir Fréquence optimale de travail)

P

Perturbations artificielles de l'ionosphère (R.725)

Perturbations ionosphériques itinérantes (R.888, R.890)

Perturbations magnétiques (R.727)

Phillips, loi de (Rec.534, R.259)

Plasma (Sup.R.252, R.342, R.728, R.887, R.893)
- caractéristiques (R.887)
- densité (R.887)
- échauffement (R.728, R.893)
- fréquence du (Sup.R.252, R.342, R.728)
- interactions (R.728, R.893)

Plasmas extraterrestres, modèles (R.887)

Polarisation (R.263, R.886)

Polarisation des antennes (R.891)

Prétraitement du signal à la station de base (R.889)

Prévision des caractéristiques ionosphériques normalisées sous incidence verticale (R.729)

Prévisions (Rec.313, R.430, R.727, R.888, R.889, R.1012) (voir aussi Prévisions de la propagation ionosphérique)
- court terme (Rec.313, R.430, R.727, R.888, R.1012)
- long terme (R.889)
- moyen terme (R.727)

Prévisions de la propagation ionosphérique (Rec.433, Rec.435, Rec.533, Rec.535, Rec.621, R.252, Sup.R.252, R.255, R.262, R.265, R.322, R.340, R.432, R.571, R.575, R.729, R.888, R.894, R.895, R.1013, R.1014, R.1015)
- Atlas des caractéristiques ionosphériques (R.340)
- bruit radioélectrique (R.322)
- comparaisons avec les valeurs observées des signaux aux fréquences comprises entre 2 et 30 MHz (R.571)
- fréquences critiques (R.252, Sup.R.252, R.340, R.888)
- fréquences entre 150 et 1600 kHz (Rec.435, R.575)
- fréquences entre 30 et 500 kHz (R.262, R.265)
- fréquences entre 2 et 30 MHz (Rec.533, R.252, Sup.R.252, R.340, R.729, R.894, R.1013)
- fréquences inférieures à 30 kHz (R.262, R.895)
- MUF (R.252, Sup.R.252, R.255, R.340, R.894)
- précision des prévisions du champ de l'onde ionosphérique, ondes kilométriques et ondes hectométriques (R.432)
- propagation vers les aéronefs à 500 kHz (R.1015)
- radiodiffusion à ondes décamétriques (Rec.621, R.894)
- radiodiffusion en Région 2 dans la bande 1605-1705 kHz (R.1014)
- trajets de grande longueur (R.729)

Probabilité de service (défin.) (R.322)

Prodiffusion (diffusion vers l'avant) (R.251, R.260)

Programmes d'ordinateurs (R.252, Sup.R.252, R.340, R.894, R.1013, Res.63)

Propagation (R.250, R.252, Sup.R.252, R.255, R.263, R.266, R.729, R.886, R.894, R.1012)
- aux latitudes élevées (R.1012)
- caractéristiques concernant la conception des systèmes (R.266)
- fréquences supérieures à la MUF (Sup.R.252, R.729, R.894)
- modes de (R.250, R.252, Sup.R.252, R.255)
- temps de (R.886)
- Terre-espace (R.263)

Propagation des ondes décamétriques (Rec.533, R.252, Sup.R.252, R.253, R.571, R.729, R.894)

Propagation des ondes extrêmement longues (R.262, R.895)

Propagation des ondes hectométriques (Rec.435, R.432, R.575, R.1014)

Propagation des ondes kilométriques (Rec.435, R.262, R.265, R.431, R.432, R.575)

Propagation des ondes métriques (Rec.534, R.259)

Propagation des ondes myriamétriques (R.262, R.895)

Propagation extraterrestre, effets (R.263)

Propagation favorisée par l'inclinaison des couches (R.250)

Propagation, fréquences supérieures à la MUF (Sup.R.252, R.729, R.894)

Propagation guidée (R.250)

Propagation ionosphérique à grande distance (R.250)

Propagation ionosphérique, considérations relatives à la (Rec.313, Rec.371, Rec.434, R.249, R.250, R.252, Sup.R.252, R.255, R.259, R.260, R.263, R.265, R.313, R.340, R.342, R.430, R.725, R.726, R.727, R.728, R.729, R.886, R.888, R.889, R.890, R.893, R.895, R.1012)
- absorption (R.263, R.729, R.893)
- affaiblissement (R.252)
- bruit (R.342)
- caractéristiques (Rec.434, R.252, Sup.R.252, R.340, R.725, R.886)
- cartes de caractéristiques (R.340)
- coefficients d'Oslo, données sur les (R.340)
- coefficients de New Delhi, données sur les (R.340)
- coefficients de réflexion (R.265)
- diffusion (R.259, R.260, R.726, R.729, R.886)
- échauffement (R.250, R.728)
- inclinaison des couches (R.250)
- indices (Rec.371, R.340, R.888)
- irrégularités (R.260, R.725, R.727, R.728, R.886, R.890)
- matrice de réflexion (R.895)
- modèles (R.255)
- orages (R.725, R.727, R.886, R.889)
- perturbations (R.725, R.727, R.886)
- prévisions de propagation, court terme (Rec.313, R.727, R.888, R.889, R.1012)
- prévisions de propagation, long terme (Rec.371, R.255)
- prévisions de propagation, moyen terme (R.727, R.888)
- processus de formation (R.725)
- sondages (R.249, R.342, R.430)
- structure, surveillance de la (R.890)
- surveillance des irrégularités (R.890)

Propagation oblique par la couche E sporadique (R.259)

Propagation par impulsions météoriques (R.251)

Propagation par le mode sifflement (R.262, R.342)

Propagation selon une corde (R.250)

Propagation Terre-espace, effets de l'ionosphère (Rec.531, R.263)

Propagation transionosphérique (Rec.531, R.263, R.886, R.893)

Propagation vers les aéronefs à 500 kHz (R.1015)

Q

Qualité de fonctionnement des circuits (R.265, R.895, R.1013)
- fréquences entre 30 et 500 kHz (R.265)
- fréquences inférieures à 30 kHz (R.895)
- méthodes fondées sur l'utilisation de micro-ordinateurs pour l'évaluation de (R.1013)

Qualité de service (défin.) (R.322)

Quartier des affaires (défin.) (R.258)

Quartier résidentiel (défin.) (R.258)

R

Radiocommunications spatiales, effets de l'ionosphère (Rec.531, R.262, R.263)

Radiodiffusion à ondes décamétriques (Rec.621, R.892, R.894)
fiabilité (R.892)

Radiogoniométrie, techniques (R.265)

Rapport signal/bruit, estimation (R.729)

Rayons cosmiques d'origine galactique (R.725)

Rayons de Pedersen (R.250)

Récepteurs pour mesures de champ (R.253)

Réception antipodale (R.250)

Réflexion par des irrégularités (R.729)

Réfraction, effets (R.263, R.893)

Région d'anomalie magnétique antarctique (R.430)

Région d'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud (R.430)

Région D, caractéristiques (R.252, Sup.R.252, R.342, R.725, R.727, R.728, R.886, R.893)

Région E, caractéristiques (R.250, R.252, Sup.R.252, R.255, R.340, R.725)

Région F, caractéristiques (R.250, R.252, Sup.R.252, R.255, R.340, R.725, R.728, R.886, R.893)

Relations Soleil-Terre (R.727)

Résonance hybride haute (R.342)

Rétrodiffusion (R.251, R.726, R.890)

Rotation de Faraday (R.263)

S

Satellites d'énergie solaire, effets sur l'ionosphère (R.893)

Scintillation ionosphérique (R.263, R.886)

Scintillation, latitudes moyennes (R.263)

Sécante, loi en (R.252)

Service international des Ursigrammes et Jours mondiaux (IUWDS) (Rec.313, R.727)

Sol, effets (Rec.435, R.252, Sup.R.252, R.259, R.726, R.895)
affaiblissement par réflexion sur le sol (R.252, Sup.R.252)
conductivité (Rec.435, R.895)
diffusion au sol (R.259, R.726)
matrice de réflexion au sol (R.895)

Sondage à incidence oblique (R.249, R.430, R.889)

Sondage à incidence verticale (R.889)

Sondage «Chirp» (à onde entretenue modulée en fréquence) (R.294, R.889)

Sondage en contre-haut (R.430, R.725)

Sondage par impulsions (R.249, R.889)

Sondage par onde pilote (R.889)

Sondage par rétrodiffusion (R.889)

Sondages (R.249, R.342, R.430)

Sous-orages (R.886)

Spectre des fluctuations d'amplitude et de phase (R.263)

Surcroît d'affaiblissement du système (R.252)

Sursauts dans le spectre radioélectrique (R.727)

Sursauts de rayons X durs (R.727)

Système de radiocommunication d'utilisation générale (R.889)

T

Tabulation des données, traitement par ordinateur des mesures de champ (R.253)

Taches solaires (Rec.371, Rs.74, V.23)
centre de données d'indices des (Rs.74, V.23)
nombres (Rec.371, Rs.74)

Température des électrons (R.728)

Température équivalente de l'antenne (R.322)

Temps de propagation de groupe (R.263)

Temps de propagation différentiel (R.265)

Traînées météoriques (R.250, R.251)

Traînées météoriques de faible densité (R.251)

Traînées météoriques de forte densité (R.251)

Traitement du signal reçu à la station éloignée (R.889)

Trajets multiples (R.252, R.266, R.431, R.432, R.729) (voir aussi Evanouissements)
diversité par (R.266)
facteur de réduction (R.266)
probabilité (R.252, R.431, R.432, R.729)

Transmodulation (Rec.552, R.574, R.728)
mesures (R.574)

Trous coronaux (R.727, R.888)

U

URSI (Rec.313, Rec.373, R.253, R.254, R.255, R.265, R.340, R.342, R.430, R.729)

Ursigrammes (Rec.313)

V

Vitesse de déplacement du plasma (R.887)

Z

Zone de latitude élevée (R.259, R.263, R.725, R.886, R.1012)
E sporadique (R.259, R.725)
ionosphère (R.886)
modélisation, pour l'exploitation, des conditions de propagation des ondes décamétriques (R.1012)
région E (R.886)
région F (R.725, R.886)
scintillation (R.263)

Zone de précipitations extérieure (R.886)

Zone équatoriale (R.250, R.259, R.263, R.430, R.725, R.890)
anomalie (R.430, R.725)
E sporadique (R.259, R.725)
electrojet (R.259)
région (R.890)
région F (R.250, R.725)
scintillation (R.263)

Zone rurale (défin.) (R.258)

Zones subaurorales (R.430)

ISBN 92-61-02752-0