



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.

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

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.

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS

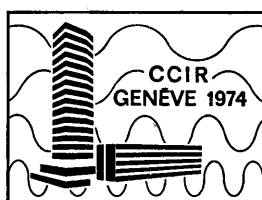
C.C.I.R.

XIII^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE

GENÈVE, 1974

VOLUME V

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS
(COMMISSION D'ÉTUDES 5)



Publié par

L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

GENÈVE, 1975

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS

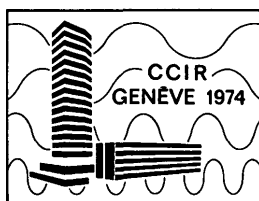
C.C.I.R.

XIII^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE

GENÈVE, 1974

VOLUME V

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS
(COMMISSION D'ÉTUDES 5)



Publié par

L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

GENÈVE, 1975

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

PROPAGATION

DANS LES

MILIEUX

NON IONISÉS

AVIS ET RAPPORTS

5A Introduction

**5B Effets dus au terrain
(y compris la propagation par onde de sol)**

5C Effets dus à l'atmosphère (radiométéorologie)

**5D Questions relatives à la radiodiffusion et aux services mobiles
(de Terre et par satellite)**

5E Questions relatives au service fixe de Terre

**5F Questions relatives aux systèmes de télécommunications spatiales
(entre points fixes et pour la recherche spatiale)**

5G Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages

**QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES,
DÉCISIONS, RÉOLUTIONS ET VŒUX**

(Commission d'études 5)

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

**RÉPARTITION DES TEXTES
DE LA XIII^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R.
PARMI LES VOLUMES I A XIII**

Les Volumes I à XIII, XIII^e Assemblée plénière, contiennent tous les textes du C.C.I.R. actuellement en vigueur. Ils se substituent à ceux de l'édition de la XII^e Assemblée plénière, New Delhi, 1970.

1. Avis, Rapports, Décisions, Résolutions et Vœux

1.1 Indications sur la numérotation de ces textes

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

Selon les décisions de la XI^e Assemblée plénière, en cas de révision de l'un de ces textes, celui-ci conserve son numéro auquel on ajoute un trait d'union et un chiffre indiquant le nombre de révisions successives. Exemples: Avis 253 pour la première version de l'Avis, Avis 253-1 pour sa première révision, Avis 253-2 pour sa deuxième révision, et ainsi de suite.

La XIII^e Assemblée plénière a adopté une nouvelle catégorie de textes appelés « Décisions » qui permet aux Commissions d'études de prendre des mesures ayant trait, en général, à l'organisation de leurs travaux et qui concerne les sujets faisant partie de leur mandat; elle permet particulièrement de créer des Groupes de travail intérimaires (mixtes s'il y a lieu) (voir la Résolution 24-3, Volume XIII). Bien que l'Assemblée plénière ait adopté dans la catégorie « Résolutions » un certain nombre de textes qui, après la modification de la Résolution 24-2, sont destinés à figurer dans la catégorie « Décisions », ces textes sont publiés, pour des nécessités pratiques, dans les Volumes de la XIII^e Assemblée plénière sous l'appellation « Décisions ». Lorsque l'un de ces textes est publié dans la catégorie « Décisions », une référence à la Résolution dont le texte a été repris dans la Décision figure entre parenthèses au-dessous du titre.

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

1.2 Avis

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
45	VIII	310, 311	V	436	III
48, 49	X	313	VI	439	VIII
77	VIII	314	II	441	VIII
80	X	325-334	I	442, 443	I
100	I	335, 336	III	444	IX
106	III	337	I	445	I
139, 140	X	338, 339	III	446	IV
162	III	341	I	447-450	X
166	XII (CMV)	342-349	III	451	XII (CMTT)
182	I	352-354	IV	452, 453	V
205	X	355-359	IX	454-456	III
214-216	X	361	VIII	457-460	VII
218, 219	VIII	362-367	II	461	XII (CMV)
224	VIII	368-370	V	462, 463	IX
237	I	371-373	VI	464-466	IV
239	I	374-376	VII	467, 468	X
240	III	377-379	I	469-472	XI
246	III	380-393	IX	473-474	XII (CMTT)
257, 258	VIII	395-406	IX	475-478	VIII
262	X	407-416	X	479	II
265, 266	XI	417-418	XI	480	III
268	IX	419	X, XI	481-484	IV
270	IX	421	XII (CMTT)	485, 486	VII
275, 276	IX	422, 423	VIII	487-496	VIII
283	IX	427-429	VIII	497	IX
289, 290	IX	430, 431	XII (CMV)	498, 499	X
302	IX	433	I	500, 501	XI
305, 306	IX	434, 435	VI	502-505	XII (CMTT)

1.3 Rapports

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
19	III	275-282	I	424-426	V
32	X	283-289	IX	428	V
42	III	292, 293	X	429-432	VI
79	X	294	XI	433-437	III
93	VIII	298-305	X	438, 439	VII
106, 107	III	306, 307	XI	440	(¹)
109	III	311, 312	XI	441	XII (CMV)
111	III	313	XII (CMTT)	443-446	IX
112	I	315	XI	448, 449	IX
122	XI	318, 319	VIII	451	IV
130	IX	321	XII (CMV)	453-455	IV
137	IX	322	(¹)	456	II
176-189	I	324-330	I	457-461	X
190	X	335	XII (CMV)	463-465	X
192, 193	I	336	V	467, 468	X
195	III	338	V	469-473	XI
196	I	340	(¹)	476-485	XI
197, 198	III	341-344	VI	486-488	XII (CMTT)
200, 201	III	345-357	III	490, 491	XII (CMTT)
202	I	358, 359	VIII	493	XII (CMTT)
203	III	361	VIII	495-498	XII (CMTT)
204-208	IV	362-364	VII	499-502	VIII
209	IX	366	VII	504-513	VIII
211-214	IV	367-373	I	515	VIII
215	IX	374-382	IX	516	X
216	VIII	383-385	IV	518	VII
222-224	II	386-388	IX	519-534	I
226	II	390, 391	IV	535-548	II
227-229	V	393	IX	549-551	III
233-236	V	394	VIII	552-561	IV
238, 239	V	395, 396	II	562-570	V
241	V	398-401	X	571-575	VI
245-251	VI	403	X	576-580	VII
252	(¹)	404, 405	XI	581-603	VIII
253-256	VI	409	XI	604-615	IX
258-266	VI	410-412	XII (CMTT)	619-622	X
267	VII	413-415	(¹)	623	X,XII (CMTT)
269-271	VII	417-420	I	624-634	XI
272, 273	I	422, 423	I	635-649	XII (CMTT)
				650	XII (CMV)

(¹) Publiés séparément.

1.4 Décisions

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
1	I	6-11	VI	17	XI
2	IV	12-14	VII	18	XII (CMTT)
3-5	V	15	VIII	19, 20	XII (CMV)
		16	IX		

1.5 Résolutions

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
4	VI	22, 23	XII (CMV)	43, 44	I
14	VII	24	XIII	48	VI
15, 16	I	26, 27	XIII	59	X
20	VIII	33	XIII	60, 61	XIII
		36, 39	XIII		

1.6 Vœux

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	I	29, 30	I	45, 46	VI
11	I	32	I	47, 48	VII
13, 14	IX	34, 35	I	49	VIII
15, 16	X	36	VII	50	IX
22, 23	VI	38-40	XI	51, 52	X
24	VIII	41	XII (CMTT)	53, 54	XI
26-28	VII	42, 43	VIII	55	XII (CMTT)
		44	I		

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.

2.2 Emplacement des Questions et Programmes d'études

Le plan de la page 8 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.

**PLAN DES VOLUMES I A XIII
DE LA XIII^e ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R.**

(Genève, 1974)

VOLUME I	Utilisation du spectre, contrôle des émissions (Commission d'études 1).
VOLUME II	Recherche spatiale et radioastronomie (Commission d'études 2).
VOLUME III	Service fixe fonctionnant sur des fréquences inférieures à 30 MHz environ (Commission d'études 3).
VOLUME IV	Service fixe utilisant des satellites de télécommunication (Commission d'études 4).
VOLUME V	Propagation dans les milieux non ionisés (Commission d'études 5).
VOLUME VI	Propagation ionosphérique (Commission d'études 6).
VOLUME VII	Services des fréquences étalon et des signaux horaires (Commission d'études 7).
VOLUME VIII	Services mobiles (Commission d'études 8).
VOLUME IX	Service fixe utilisant les systèmes de faisceaux hertziens (Commission d'études 9). Coordination et partage de fréquences entre les systèmes de service fixe par satellite et les faisceaux hertziens terrestres (sujets communs aux Commissions d'études 4 et 9).
VOLUME X	Service de radiodiffusion (sonore) y compris l'enregistrement des programmes de radiodiffusion sonore et l'utilisation de satellites (Commission d'études 10).
VOLUME XI	Service de radiodiffusion (télévision) y compris l'enregistrement des programmes de télévision et l'utilisation de satellites (Commission d'études 11).
VOLUME XII	Transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision sur une grande distance (CMTT). Vocabulaire (CMV).
VOLUME XIII	Renseignements relatifs à la XIII ^e Assemblée plénière. Structure du C.C.I.R. Listes des textes émis par le C.C.I.R.

Note. — Pour faciliter les références, le numérotage des pages est le même dans les volumes édités en français, en anglais et en espagnol.

VOLUME V *

INDEX DES TEXTES **

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

(Commission d'études 5)

		Page
Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 5.		13
SECTION 5A: Introduction. <i>Introduction aux textes de la Commission d'études 5. Propagation dans les milieux non ionisés.</i>		17
SECTION 5B: Effets dus au terrain (y compris la propagation par onde de sol)		27
SECTION 5C: Effets dus à l'atmosphère (radiométéorologie)		63
SECTION 5D: Questions relatives à la radiodiffusion et aux services mobiles (de terre et par satellite). . . .		113
SECTION 5E: Questions relatives au service fixe de Terre.		209
SECTION 5F: Questions relatives aux systèmes de télécommunications spatiales (entre points fixes et pour la recherche spatiale)		247
SECTION 5G: Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages		257
AVIS	Section	
Avis 310-3 Définitions de termes se rapportant à la propagation dans la troposphère	5C	63
Avis 311-2 Mode de présentation des données obtenues au cours de l'étude de la propagation troposphérique. <i>Radiodiffusion et télévision.</i>	5D	113
Avis 368-2 Courbes de propagation pour l'onde de sol aux fréquences comprises entre 10 kHz et 10 MHz	5B	27
Avis 369-1 Définition d'une atmosphère fondamentale de référence	5C	65
Avis 370-2 Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz. <i>Services de radiodiffusion</i>	5D	116
Avis 452-1 Données relatives à la propagation pour l'évaluation des brouillages dans les services spatiaux ou dans les services de Terre ou entre eux et pour le calcul des distances de coordination.	5G	257
Avis 453 Formule donnant l'indice de réfraction radioélectrique	5C	65
RAPPORTS		
Rapport 227-1 Méthodes générales de mesure du champ et des paramètres qui s'y rapportent	5D	143
Rapport 228-1 Mesure du champ pour les services de radiodiffusion y compris la télévision sur ondes métriques et décimétriques.	5D	152

* Bien que les documents de travail cités dans ce Volume portent la référence « Période 1970-1973 » pour les documents des années 1971 et 1972 et la référence « Période 1970-1974 » pour les documents des années 1973 et 1974, il s'agit, bien entendu, dans tous les cas de la période 1970-1974 entre les Assemblées plénières de New Delhi et de Genève. C'est pourquoi, pour des raisons d'uniformité, toutes les références à ces documents dans ce Volume sont faites avec la mention « Période 1970-1974 ».

** Dans ce Volume, les Avis et Rapports sont groupés en sections traitant d'un même sujet. En raison de la numérotation utilisée pour ces textes, il n'est pas possible de les présenter dans l'ordre numérique en respectant également l'ordre numérique pour la pagination. En conséquence, l'index ci-dessus qui suit l'ordre numérique pour les textes ne respecte pas l'ordre numérique pour la pagination.

	Section	Page
Rapport 229-2 Caractéristiques électriques de la surface de la Terre	5B	39
Rapport 233-3 Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes. <i>Propagation sol-sol</i>	5C	66
Rapport 234-3 Influence de l'atmosphère non ionisée sur la propagation des ondes. <i>Propagation</i> <i>Terre-espace</i>	5C	80
Rapport 235-2 Effets de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz . . .	5C	94
Rapport 236-3 Influence des accidents de terrain sur la propagation troposphérique	5B	48
Rapport 238-2 Données sur la propagation nécessaires pour les faisceaux hertziens transhorizon . .	5E	209
Rapport 239-3 Résultats statistiques relatifs à la propagation, pour le service de radiodiffusion dans la gamme de fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz	5D	163
Rapport 241-2 Données sur la propagation nécessaires à la prévision de la qualité de fonctionnement des systèmes de télécommunication de Terre et au calcul des brouillages sur les trajets terrestres. <i>Collecte de données</i>	5E	230
Rapport 336-1 Réception sur la lune	5B	52
Rapport 338-2 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe. .	5E	231
Rapport 424-1 Courbes de propagation sur ondes métriques, décimétriques et centimétriques pour le service mobile aéronautique	5D	178
Rapport 425-1 Estimation de l'affaiblissement de transmission dans la propagation troposphérique. <i>Utilisation d'ordinateurs dans l'établissement de courbes de propagation pour la radio-</i> <i>diffusion et les services mobiles</i>	5D	185
Rapport 426-1 Méthodes de prévision du bruit radioélectrique, de l'absorption et de la réfraction des ondes dans les systèmes de télécommunication spatiale. <i>Rassemblement de données</i>	5F	247
Rapport 428-1 Calcul à l'ordinateur de courbes de propagation de l'onde de sol	5B	54
Rapport 562 Données de propagation pour la radiodiffusion sonore et la télévision dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz. <i>Service de radiodiffusion de Terre à 12 GHz</i>	5D	198
Rapport 563 Données radiométéorologiques.	5C	96
Rapport 564 Données sur la propagation nécessaires aux systèmes de télécommunication spatiale	5F	249
Rapport 565 Données sur la propagation pour la radiodiffusion par satellite aux fréquences supé- rieures à 10 GHz.	5D	200
Rapport 566 Propagation en espace libre	5A	21
Rapport 567 Courbes de propagation et statistiques pour le service mobile terrestre fonctionnant dans les bandes comprises entre 30 MHz et 1 GHz	5D	201
Rapport 568 Diffraction sur la terre sphérique.	5B	55
Rapport 569 Evaluation des facteurs de propagation liés aux problèmes de brouillage aux fréquences supérieures à 0,6 GHz environ	5G	258
Rapport 570 Diffraction par les obstacles. <i>Estimation de l'affaiblissement</i>	5B	57

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES

Question 1-2/5 Influence du sol sur la propagation troposphérique	289
Programme d'études 1A-1/5 Effets des accidents de terrain sur la propagation troposphérique	290
Question 2-2/5 Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes. <i>Radiométéo-</i> <i>rologie pour les télécommunications</i>	291
Question 3-1/5 Effets de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz	292

	Page
Question 5-2/5 Données sur la propagation nécessaires pour les systèmes de télécommunication de Terre et spatiale	293
Programme d'études 5A-2/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe	293
Programme d'études 5B-1/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens transhorizon	294
Programme d'études 5C-2/5 Données sur la propagation nécessaires aux systèmes de radiocommunication spatiale	296
Programme d'études 5D-2/5 Facteurs de propagation affectant le partage des bandes de fréquences radioélectriques entre les systèmes de Terre et les stations terriennes des services de télécommunication spatiale	297
Programme d'études 5E-2/5 Rôle joué par la diffusion provoquée par les précipitations dans les brouillages entre systèmes de Terre et systèmes Terre-espace	298
Question 7/5 Courbes de propagation et données sur la propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour le service de radiodiffusion, les services mobiles et le service de radiorepérage. <i>Radio-communications de Terre et radiocommunications spatiales</i>	299
Programme d'études 7B/5 Données de propagation nécessaires pour la radiodiffusion (y compris la radio-diffusion par satellite) dans les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz.	300
Programme d'études 7C/5 Questions de propagation présentant de l'importance pour les services mobiles utilisant des systèmes de télécommunication ou de radiorepérage par satellite.	301
Programme d'études 7D/5 Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz pour le service de radiodiffusion	301
Programme d'études 7E/5 Courbes de propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour le service mobile terrestre	302
Programme d'études 7F/5 Courbes de propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour les services mobiles aéronautique et maritime et pour le service de radiorepérage	303
 DÉCISIONS	
Décision 3 Prévission de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol	304
Décision 4 Données relatives à la propagation troposphérique pour la radiodiffusion, les télécommunica-tions spatiales et les liaisons entre points fixes	305
Décision 5 Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes	306

RÉSOLUTIONS

Il n'y a pas de Résolutions se rapportant aux travaux de la Commission d'études 5.

VŒUX

Il n'y a pas de Vœux se rapportant aux travaux de la Commission d'études 5.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

COMMISSION D'ÉTUDES 5

Mandat:

Etudier la propagation des ondes radioélectriques (et des bruits):

- à la surface de la Terre,
- à travers les régions non ionisées de l'atmosphère terrestre,
- dans l'espace où l'effet d'ionisation est négligeable, dans le but d'améliorer les radiocommunications.

Rapporteur principal: J. A. SAXTON (Royaume-Uni)

Vice-Rapporteur principal: A. KALININ (U.R.S.S.)

INTRODUCTION PAR LE RAPPORTEUR PRINCIPAL DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 5

Au cours de la période comprise entre la XII^e et la XIII^e Assemblée plénière, la Commission d'études 5 a entrepris de rationaliser la présentation de ses textes, en vue de faciliter leur utilisation systématique par les ingénieurs des radiocommunications. Immédiatement après ce rapport du Rapporteur principal, on trouvera une Introduction aux textes de la Commission d'études 5 qui indique la portée des travaux de cette Commission, en spécifiant brièvement les différentes catégories de phénomènes de propagation dans les milieux non ionisés susceptibles de poser des problèmes à l'ingénieur qui établit les plans des divers types de systèmes. Cette Introduction contient également une reclassification des textes de la Commission d'études, en sept sections, dans une structure qui est sans doute de nature à faciliter la tâche de l'ingénieur.

En rationalisant ses textes et en modifiant la présentation de ses documents, la Commission d'études 5 a eu deux ordres de préoccupations portant, d'une part sur les critères dont dépend la fiabilité d'un service en l'absence de brouillage, d'autre part sur les facteurs qui conditionnent l'apparition possible de brouillages entre les services, qu'il s'agisse des services de Terre ou des services de télécommunications spatiales. Ce faisant, la Commission a été amenée à annuler un certain nombre de Rapports adoptés à la XII^e Assemblée plénière; dans de nombreux cas, les textes de ces Rapports, ou des parties de ces textes, sont inclus dans des Rapports existants ou dans de nouveaux Rapports. On trouvera des exemples de ces modifications au § 3 ci-après.

1. Portée générale des travaux de la Commission d'études

Comme par le passé, les travaux de la Commission portent sur des études relatives à la propagation de l'onde de sol au-dessus de terrains non accidentés, sur les effets produits par les trajets mixtes et les accidents de terrain, tant naturels qu'artificiels. Il y a lieu de noter que, en prévision de la XIII^e Assemblée plénière, la Commission a étendu la portée de l'Avis 368-2: « Courbes de propagation pour l'onde de sol aux fréquences comprises entre 10 kHz et 10 MHz », en faisant figurer dans ce texte de nouvelles courbes de champ et en y mentionnant la propagation sur trajets mixtes comme base des travaux de planification qui seront effectués par la Réunion préparatoire (1974) de la Conférence de radiodiffusion à ondes kilométriques et hectométriques qui doit se réunir à Genève. Cependant, l'essentiel des activités de la Commission d'études concerne les effets de la troposphère sur la propagation des ondes, aux points de vue de la fiabilité des services de radiocommunication (de Terre et spatiales) et de leur sensibilité aux effets du brouillage. La Commission s'attache tout particulièrement à fournir des renseignements sur la propagation, de manière à faciliter un partage des fréquences systématique et sûr. Ce travail est tributaire d'études approfondies de radiométéorologie; à cet égard, il y a lieu d'intensifier les études sur la structure et l'intensité des précipitations pluviales dans les divers climats, pour ce qui touche aux radiocommunications de Terre et aux télécommunications spatiales.

Dans toutes ses activités, la Commission d'études cherche à utiliser le plus largement possible les techniques d'informatique, là où ces techniques sont applicables.

2. Groupes de travail intérimaires (GTI)

La Commission d'études dispose de trois Groupes de travail intérimaires, créés respectivement en application de la Décision 3 (GTI 5/1), de la Décision 4 (GTI 5/2) et de la Décision 5 (GTI 5/3). Les deux derniers d'entre eux ont tenu une réunion commune à Nice (France), en décembre 1970, afin d'établir un rapport sur les données de propagation nécessaires pour l'évaluation de la distance de coordination: il s'agissait de faciliter les travaux de la Réunion spéciale mixte des Commissions d'études du C.C.I.R. chargée de préparer les bases techniques pour la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales qui s'est réunie à Genève en 1971. Dans le déroulement de ces travaux, un fait s'est imposé, à savoir qu'il était souhaitable d'étudier de façon approfondie le problème des facteurs de propagation qui sont à la base de l'apparition des brouillages. Le GTI 5/2 a donc tenu une nouvelle réunion à Bournemouth, en Angleterre, en septembre-octobre 1973, réunion au cours de laquelle il a procédé à cette étude, qui a servi de base à l'élaboration du nouveau Rapport 569. A l'époque, le rapport établi à l'intention de la Réunion spéciale mixte constituait un texte satisfaisant pour définir une méthode de calcul de la distance de coordination, mais ce texte est maintenant dépassé par le nouveau Rapport 569 dont il vient d'être question. En conséquence, il y a lieu dorénavant d'utiliser ce texte pour toute modification des méthodes qui interviennent dans les procédures de coordination. De toute évidence, il faudra cependant poursuivre l'étude de ce problème, en raison notamment de ses incidences sur le partage des fréquences; ce sujet occupera encore une place importante dans les activités de la Commission d'études 5 et les travaux dans ce sens sont à mener d'urgence.

Le GTI 5/1 s'est réuni à Nice, en mai 1973, pour étudier l'application pratique des données météorologiques, topographiques et géologiques à la prévision de la phase et de l'amplitude des ondes radioélectriques. Dans ce domaine également, les études devront se poursuivre; le Groupe de travail intérimaire examinera notamment de quelle manière les effets de la réfraction troposphérique et du gain de hauteur devront intervenir dans le calcul des courbes de champ de l'onde de sol. Il convient de signaler enfin que tous les Groupes de travail intérimaires ont aussi travaillé par correspondance et qu'ils continueront de le faire. Il est possible que d'autres réunions soient organisées, mais seulement si elles se révèlent nécessaires pour une bonne coordination des travaux, durant les périodes séparant les réunions de la Commission d'études.

3. Remaniement des textes

Comme conséquence du remaniement de la documentation de la Commission d'études, certains textes bien connus jusqu'ici ont maintenant disparu. Les indications qu'ils contenaient ont été mises à jour, le cas échéant, et incluses dans d'autres textes. On trouvera ci-après des exemples de ces transformations.

Le Rapport 244-2 est annulé et des passages de ce texte se trouvent maintenant dans les Rapports 233-3, 238-2 et 338-2, ainsi que dans les quatre nouveaux Rapports 563, 566, 568 et 570. De même, les Questions 8/5 et 9/5 ont été annulées et les sujets dont elles traitaient ont été repris et mis à jour dans les deux nouveaux Programmes d'études 7B/5 et 7C/5, ces programmes d'études découlant de la Question 7/5. On a profité de l'occasion pour lever certaines ambiguïtés et supprimer des chevauchements des anciens textes.

La section d'Introduction du présent volume contient aussi le nouveau Rapport 566. Ce Rapport traite de la propagation en espace libre, sujet d'importance fondamentale pour toutes les questions de propagation, et qui n'a pas sa place, par conséquent, dans l'une quelconque des six sections qui le suivent.

4. Conclusions

La portée des travaux de la Commission d'études 5 s'étend rapidement et il apparaît de plus en plus à l'évidence que les renseignements fournis pour les régions tropicales sont insuffisants pour les besoins de la planification. Il est vrai que plusieurs administrations apportent une aide fort précieuse dans ce domaine mais, en dépit de leurs efforts, il reste un grand nombre de zones très étendues pour lesquelles on ne possède absolument pas de renseignements. A cet égard, il faut souligner l'extrême importance qui s'attache à toutes données radioélectriques ou météorologiques qui permettraient d'améliorer les méthodes de prévision de la propagation, du double point de vue de la fiabilité ou de l'évaluation des brouillages. Une importance particulière revient aux données statistiques concernant les variations, dans l'espace et dans le temps, des précipitations pluviales de grande intensité. Il serait utile également d'indiquer si les résultats d'observation obtenus sur le terrain concordent avec les données contenues dans ce volume, ou s'ils s'écartent de ces données.

Quoi qu'il en soit, il est encourageant de constater que la participation aux travaux de la Commission d'études 5 s'est grandement accrue depuis la XII^e Assemblée plénière de New Delhi, 1970. On insiste beaucoup, actuellement, sur l'étude des systèmes, dans toutes les branches des radiocommunications, ce qui donne une importance capitale aux données de propagation. Il se trouve que ces travaux sont facilités par la tendance actuelle des activités de la Commission d'études 5.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5A: INTRODUCTION

AVIS ET RAPPORTS

Avis

Il n'y a pas d'Avis dans cette section

INTRODUCTION AUX TEXTES DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 5

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

1. Introduction

La Commission d'études 5 a pour mandat d'étudier la propagation des ondes radioélectriques (et celles des bruits)

- à la surface de la Terre,
- à travers les régions non ionisées de l'atmosphère terrestre,
- dans l'espace extra-atmosphérique, là où l'effet d'ionisation est négligeable,

dans le but d'améliorer les radiocommunications. Les effets dus au terrain dépendent soit de la topographie, soit des caractéristiques électriques de la surface de la Terre; ces effets se font sentir dans toute l'étendue du spectre des fréquences radioélectriques. La partie la plus importante de la région non ionisée de l'atmosphère est la troposphère, dont l'influence sur la propagation des ondes est en fait limitée aux fréquences supérieures à 30 MHz environ. La propagation dans l'espace extra-atmosphérique est surtout une extension du concept d'espace libre largement appliqué dans les calculs en général. Ces facteurs définissent donc les zones d'activité essentielles de la Commission d'études 5.

Le problème fondamental auquel un ingénieur des radiocommunications se trouve confronté lorsqu'il doit mettre sur pied un service est d'obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant, ou un très faible taux d'erreur dans le cas des systèmes numériques. Autrement dit, l'ingénieur doit faire en sorte que le signal soit tel qu'il satisfasse aux critères de qualité du service dont il s'agit, compte tenu des circonstances dans lesquelles celui-ci sera exploité. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire qu'il connaisse les fluctuations du signal désiré, d'une part, celles du bruit, d'autre part. Le niveau de bruit, si on le considère dans son ensemble, est, pour une part, contrôlable et, pour une autre part, incontrôlable. Dans ce contexte, le bruit est composé:

- du bruit qui a pris naissance dans l'équipement terminal ou qui est inhérent au système (par exemple, le bruit d'intermodulation dans les liaisons MRF/MF utilisant la diffusion troposphérique);
- de bruit artificiel, c'est-à-dire du bruit radioélectrique produit par des appareils, des machines, etc., utilisés par l'homme, mais distinct des émissions d'autres services de radiocommunication;
- de bruit dû à des causes naturelles, y compris le bruit d'origine extra-terrestre;
- de signaux émis par des services de radiocommunication autres que ceux que l'on désire recevoir, autrement dit du brouillage.

Note. — On verra que, *dans ce contexte*, toute énergie radioélectrique non désirée à la réception est considérée comme étant du bruit.

Par conséquent, il est avant tout essentiel que l'ingénieur ait une idée réaliste du niveau total, variable, du bruit avec lequel il aura vraisemblablement à compter, ainsi que de ses caractéristiques. En se fondant sur les spécifications d'un système particulier, il lui sera alors possible de définir l'intensité minimale du signal requise pour assurer un service fiable dans des circonstances données. Ceci découle normalement des spécifications du système concernant les valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne doivent pas être dépassées pendant un pourcentage de temps donné, généralement 99,9 % ou 99,99 % d'une année ou du mois le plus mauvais. Le brouillage total en provenance de quelque source que ce soit ne doit par conséquent pas altérer d'une manière appréciable la qualité de

fonctionnement du système pendant un pourcentage de temps plus élevé que le complément à 100 %, par exemple, 0,1 % ou 0,01 % respectivement, dans le cas mentionné ci-dessus. Il faut entendre par là que, les signaux désirés et toutes les formes de bruit (autres que le bruit inhérent au système) dépendant de la manière dont les ondes se propagent, il est essentiel de connaître quelle sera, sur le trajet de la liaison, la valeur de l'affaiblissement de transmission qui ne sera pas dépassée pendant, par exemple, 99,9 % du temps; de même il serait essentiel de connaître, pour tous les trajets de bruit connexes, les valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne seraient pas dépassées pendant 0,1 % du temps. Il est plus difficile de déterminer ces dernières valeurs que les premières. Considérant, premièrement l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, deuxièmement la nécessité d'attribuer des bandes de fréquences en partage à différents services et troisièmement, la nécessité de répéter l'emploi de la même fréquence à l'intérieur d'un même service, l'utilisation d'une puissance rayonnée excessive pour maintenir la qualité d'un service donné en présence de bruit va à l'encontre du but recherché et ne devrait jamais être envisagée.

2. Types de services

D'une manière générale, les services peuvent être répartis en deux catégories:

- les services entre un point fixe et une zone; par exemple: radiodiffusion sonore, télévision, services mobiles;
- les services entre points fixes.

Bien entendu, on peut considérer que la première catégorie comporte une multiplicité de trajets individuels, mais jusqu'à présent, le problème de la détermination de la qualité de service n'a été traité, en général, que sur une base statistique, étant donné l'impossibilité d'étudier tous les trajets individuels en cause. Il convient toutefois de noter que les récents progrès de la technique des ordinateurs et les moyens dont on dispose en plus grand nombre pour évaluer les caractéristiques de trajets types entre points fixes, ont permis d'aborder de façon plus rigoureuse le problème des trajets entre point fixe et zone de service.

Les deux catégories mentionnées plus haut peuvent être à leur tour subdivisées d'une manière générale:

- en services pour lesquels les trajets de propagation sont exclusivement terrestres,
- en services pour lesquels les trajets de propagation sont entre Terre et espace ou entre espace et espace.

A l'exception des services pour lesquels la propagation est affectée par l'ionosphère, tous les services dépendent dans une certaine mesure des données sur la propagation établies par la Commission d'études 5; ces services comprennent, en plus de ceux qui ont été mentionnés plus haut, la radiodétection, les aides à la navigation, la radioastronomie, la télémétrie spatiale. Par conséquent, les sujets de certains Rapports de la Commission d'études 5 sont très généraux par nature (par exemple, la radiométéorologie et la propagation par l'onde de sol) et ne sont pas limités à une catégorie particulière de services. Les caractéristiques principales des phénomènes de propagation sont passées en revue dans la section suivante.

3. Caractéristiques de la propagation

3.1 Effets dus au terrain

Lorsque les ondes radioélectriques se propagent à la surface de la Terre ou par le sol, les caractéristiques de la propagation sont déterminées:

- par les propriétés électriques du sol,
- par la configuration physique de la surface de la Terre, y compris la végétation et les structures de dimensions quelconques édifiées par l'homme.

A l'exception de la transmission par le sol, dont l'importance est faible, et peut-être de quelques aspects de la transmission sur des trajets mixtes, les caractéristiques électriques du sol jouent un rôle primordial aux fréquences inférieures à 10 MHz * environ. Aux fréquences supérieures à environ

* Il y a cependant des cas où ces caractéristiques peuvent jouer un certain rôle à des fréquences plus élevées (voir le Rapport 568, Fig. 1, facteur K et le Rapport 229-2 en général).

30 MHz, c'est alors la configuration physique du terrain qui compte le plus. Son effet sur l'affaiblissement de transmission global est déterminé par la fréquence utilisée, ainsi que par les caractéristiques électriques en cause et la topographie du terrain. Il convient de noter que, dans le cas de la propagation troposphérique près de la surface terrestre, les irrégularités du terrain jouent toujours un rôle important.

3.2 *Effets dus à la troposphère*

Les ondes qui se propagent à travers les régions non ionisées de l'atmosphère subissent l'influence de ses composants gazeux, ainsi que de toutes formes de nuages et de précipitations. L'importance relative de ces facteurs dépend du climat et de la fréquence.

Les effets des composants gazeux de l'atmosphère sur la propagation des ondes radioélectriques sont l'absorption d'énergie et les variations de l'indice de réfraction qui entraînent la réflexion, la réfraction et la diffusion des ondes. L'absorption, qui résulte principalement de la présence d'oxygène, de vapeur d'eau et d'eau à l'état liquide, n'est pas appréciable aux fréquences inférieures à environ 3 GHz. Mais, bien que les phénomènes liés aux variations de l'indice de réfraction apparaissent aux fréquences inférieures à 30 MHz, ces phénomènes jouent un rôle essentiel dans la planification des systèmes aux fréquences supérieures à 30 MHz environ.

Les nuages et les précipitations influent sur la propagation de deux façons fondamentales:

- par absorption d'une partie de l'énergie qui les traverse,
- par diffusion des ondes radioélectriques incidentes.

La diffusion contribue nettement à l'affaiblissement du lobe frontal, mais elle joue aussi un rôle important en détournant l'énergie dans d'autres directions, y compris vers l'arrière en direction de l'émetteur. Ici aussi, ces effets sont d'une certaine importance aux fréquences supérieures à 3 GHz environ.

La variabilité des caractéristiques de la propagation sous l'influence des effets dus aux phénomènes atmosphériques est également de la plus grande importance pour la détermination des brouillages que les systèmes radioélectriques sont vraisemblablement exposés à subir, en particulier dans le cas des modes de propagation des émissions bien au-delà de l'horizon normal.

3.3 *Effets dus à la propagation par trajets multiples*

On entend par là tous les cas où le signal effectivement reçu comporte plusieurs composantes qui parviennent à l'antenne de réception par différents trajets de transmission. Ces composantes ont des phases différentes et peut-être des amplitudes différentes; leurs relations de phase varient continuellement avec le temps. Ce phénomène est dû à une multiplicité de trajets dans la troposphère, à des réflexions sur des objets comme les avions, à des réflexions spéculaires sur des plans d'eau tels que les lacs et les rivières, les marais et les estuaires, ainsi que sur des interfaces horizontales entre différentes couches de l'atmosphère. Cette multiplicité des trajets (cause de tous les évanouissements rapides observés sur les liaisons radioélectriques) peut détériorer considérablement la qualité d'un service, notamment en ce qui concerne la largeur de bande; elle se manifeste assez souvent, même dans le cas de la propagation en visibilité directe.

3.4 *Bruits*

Le principal sujet de préoccupation de la Commission d'études 5 à l'égard du bruit a trait au bruit que l'on constate aux fréquences pour lesquelles l'atmosphère non ionisée et la Terre elle-même influent sur la propagation. Dans ce bruit il faut inclure le bruit artificiel aux fréquences dont il s'agit, le bruit produit par l'atmosphère et ses éléments constitutifs, le bruit galactique et le bruit rayonné par la Terre et par les obstacles qui se trouvent à sa surface.

4. *Classification des textes*

Afin de faciliter l'application pratique des données sur la propagation, les textes de la Commission d'études 5 ont été classés de la manière suivante (voir le Tableau I):

Section 5A: Introduction

Section 5B: Effets du sol (y compris la propagation de l'onde de sol)

Section 5C: Effets de l'atmosphère (radiométéorologie)

Section 5D: Aspects relatifs à la radiodiffusion et aux services mobiles (services de Terre et services par satellite)

Section 5E: Aspects relatifs au service fixe de Terre

Section 5F: Aspects relatifs aux systèmes de télécommunications spatiales (entre points fixes et recherche spatiale)

Section 5G: Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages

Les textes des Sections 5A, 5B et 5C ont une portée générale et sont communs à plusieurs applications, mais ceux des autres sections ont trait à des types de service déterminés. La Section 5D comprend les textes se rapportant à la radiodiffusion en ondes métriques et décimétriques, à la radio-diffusion aux fréquences supérieures à 10 GHz, aux services mobiles terrestre, aéronautique et maritime, aux services de radiorepérage (en englobant chaque fois, s'il y a lieu, les radiocommunications de Terre et les radiocommunications spatiales), ainsi qu'aux techniques de mesure associées. La Section 5E expose les problèmes du partage des fréquences entre les systèmes fixes de Terre, les stations terriennes et la radioastronomie. La Section 5F comprend les textes relatifs au partage des fréquences entre les satellites et les faisceaux hertziens de Terre. Quant à la Section 5G, elle comporte une analyse détaillée des facteurs de propagation qui jouent un rôle important dans l'évaluation des brouillages. Cette section, qui est elle aussi d'une application générale, renferme des textes essentiels pour l'examen de tous les problèmes de partage des fréquences.

La Commission d'études 5 est d'avis que cette répartition des textes est la plus commode pour les applications pratiques. Cependant, il importe de reconnaître les relations mutuelles qui existent entre beaucoup de caractéristiques de la propagation; dans un grand nombre de cas, les effets de plus d'un mode de propagation se superposent; aussi est-il essentiel d'avoir une compréhension bien nette de chacun de ces phénomènes et de leur probabilité d'occurrence pour être à même d'évaluer leur effet global sur un système particulier.

TABLEAU I

Classification des textes

Sujets	Avis	Rapports	Questions (1) s'y rapportant	Programmes d'études (1) s'y rapportant
Introduction par le Rapporteur principal				
5A. Introduction	—	Introduction aux textes, 566		
5B. Effets du sol (y compris la propagation de l'onde de sol)	368-2	229-2, 236-3, 336-1, 428-1, 568, 570	1-2/5	1A-1/5
5C. Effets de l'atmosphère (radiométéorologie)	310-3, 369-1, 453	233-3, 234-3, 235-2, 563	2-2/5, 3-1/5	5E-2/5
5D. Aspects relatifs à la radiodiffusion et aux services mobiles (services de Terre et par satellite)	311-2, 370-2	227-1, 228-1, 239-3, 424-1, 425-1, 562, 565, 567	5-2/5, 7/5	5C-2/5, 7B/5, 7C/5, 7D/5, 7E/5, 7F/5
5E. Aspects relatifs au service fixe de Terre	—	238-2, 241-2, 338-2	5-2/5	5A-2/5, 5B-2/5
5F. Aspects relatifs aux systèmes de télécommunications spatiales (entre points fixes et pour la recherche spatiale)	—	426-1, 564	5-2/5	5C-2/5
5G. Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages	452-1	569	5-2/5	5D-2/5, 5E-2/5

(1) Les Questions et Programmes d'études sont inscrits dans ce Tableau en regard de la section à laquelle ils s'appliquent; cependant, dans le présent Volume, on ne les trouvera pas dans la section indiquée, car ils ont tous été groupés à la fin du Volume afin qu'on puisse plus facilement les retrouver.

5A: *Rapports*

RAPPORT 566 *

PROPAGATION EN ESPACE LIBRE

(1974)

1. Introduction

Comme la propagation en espace libre est souvent prise comme référence dans les autres textes du C.C.I.R., on a rassemblé dans ce Rapport certaines formules qui la concernent. En outre des nomogrammes permettent un calcul graphique approché qui peut être utile dans de nombreux cas.

2. Formules fondamentales

La propagation en espace libre peut être calculée de deux façons différentes, chacune d'elles étant plus spécialement adaptée à un type de service.

- 2.1 S'il existe un émetteur desservant de nombreux récepteurs distribués de façon aléatoire (Radiodiffusion, Service mobile), on calcule le champ à une certaine distance de l'émetteur et dans une direction donnée, par la relation:

$$E = \frac{\sqrt{30 W}}{d} \quad \text{unités mks} \quad (1)$$

E étant le champ

W étant la puissance isotrope rayonnée équivalente

d étant la distance

La formule (1) est souvent remplacée par la formule (2) qui utilise des unités pratiques:

$$E_{\text{mV/m}} = 173 \cdot \frac{\sqrt{W_{\text{kW}}}}{d_{\text{km}}} \quad (2)$$

Ces relations sont représentées par la Fig. 1.

- 2.2 S'il s'agit d'une liaison entre points fixes, il est préférable de calculer l'affaiblissement entre antennes isotropes, appelé aussi affaiblissement de transmission de référence:

$$L_b = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3)$$

L_b étant l'affaiblissement de transmission de référence en décibels

d étant la distance

λ étant la longueur d'onde

d et λ étant exprimés avec la même unité.

La formule (3) peut encore s'écrire en utilisant la fréquence au lieu de la longueur d'onde.

$$L_b = 32,45 + 20 \log f_{\text{MHz}} + 20 \log d_{\text{km}} \quad (4)$$

Les relations (3) et (4) sont représentées sur la Fig. 2.

- 2.3 En outre il existe des relations entre les caractéristiques d'une onde plane (ou d'une onde assimilable à une onde plane) en un point:

$$P = \frac{E^2}{120\pi} = \frac{4\pi W}{\lambda^2} \quad \text{unités mks} \quad (5)$$

* Adopté à l'unanimité.

P étant la puissance surfacique

E étant le champ

W étant la puissance captée par une antenne isotrope placée en ce point

λ étant la longueur d'onde

Les relations (5) sont représentées à la Fig. 3.

BIBLIOGRAPHIE

BOITHIAS, L. [1972] *Calcul par nomogrammes de la propagation des ondes* (édition quadrilingue), Eyrolles, Paris.

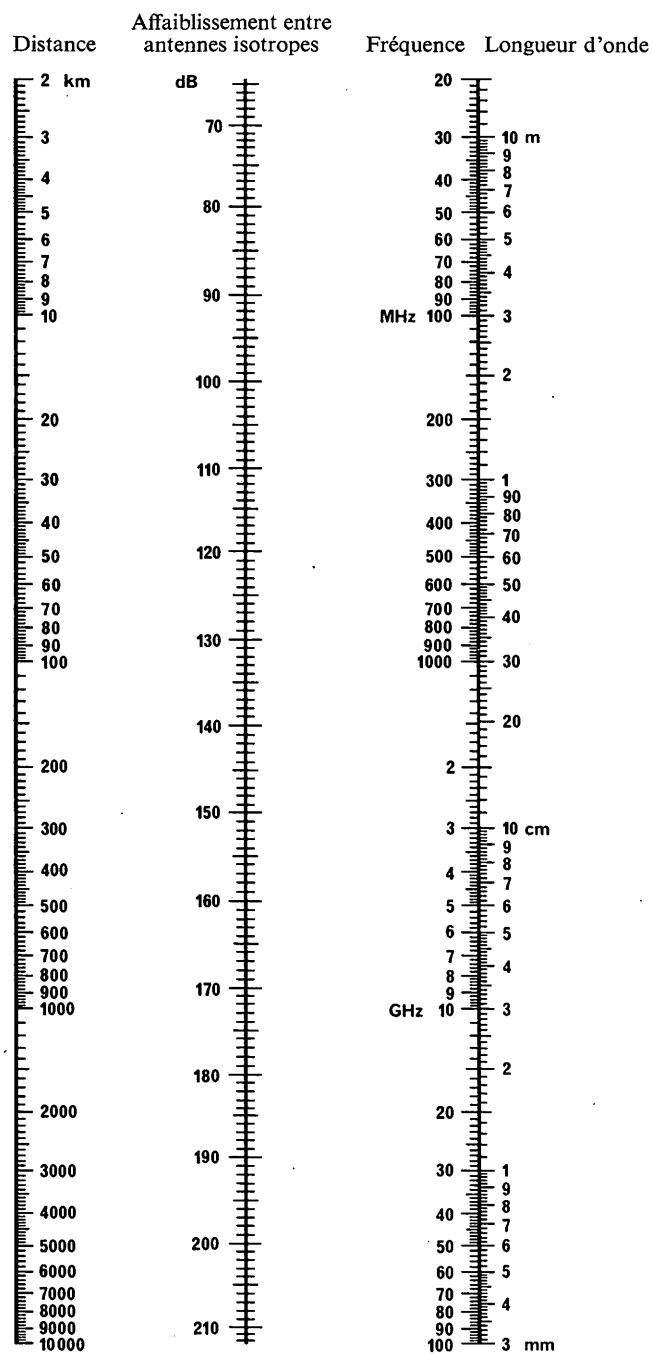


FIGURE 2

Affaiblissement de transmission en espace libre entre antennes isotropes

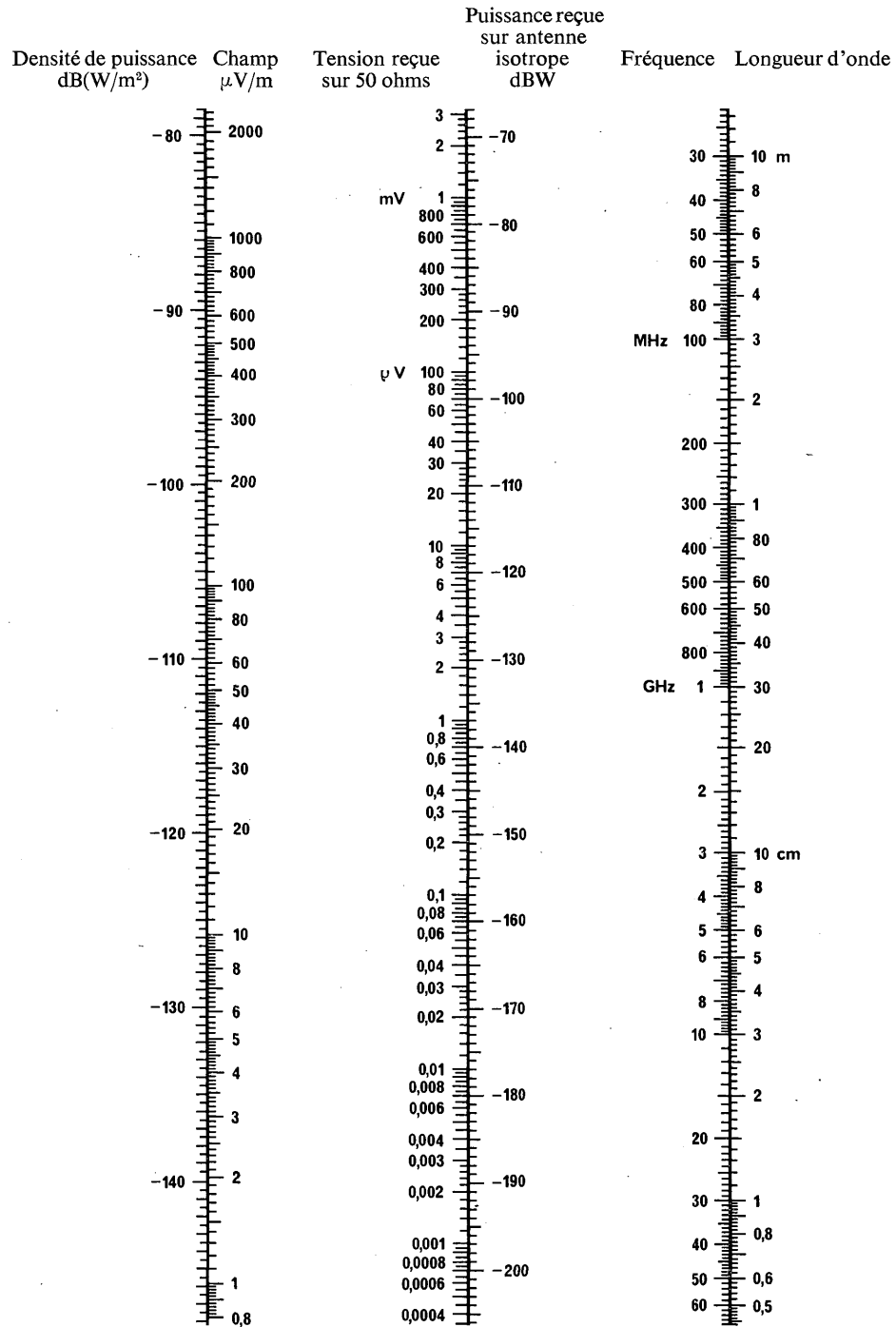


FIGURE 3

Caractéristiques d'une onde plane

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5B: EFFETS DUS AU TERRAIN (Y COMPRIS LA PROPAGATION PAR ONDE DE SOL)

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 368-2

**COURBES DE PROPAGATION POUR L'ONDE DE SOL
AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 10 kHz ET 10 MHz**

(Question 3-1/5)

(1951 – 1959 – 1963 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que les courbes de propagation pour l'onde de sol, dans une gamme étendue de fréquences, présentent une importance sans cesse croissante pour tous les types de radiocommunication, y compris les aides à la navigation;
- b) qu'on doit disposer d'une famille de telles courbes correspondant à de nombreuses valeurs de la conductivité du sol si l'on veut qu'elles s'appliquent aux conditions variées rencontrées, en pratique, au long des trajets terrestres,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les courbes ci-jointes (voir Annexe), utilisées dans les conditions spécifiées dans le texte accompagnant les courbes, soient adoptées pour la détermination du champ de l'onde de sol pour les fréquences inférieures à 10 MHz.

ANNEXE I

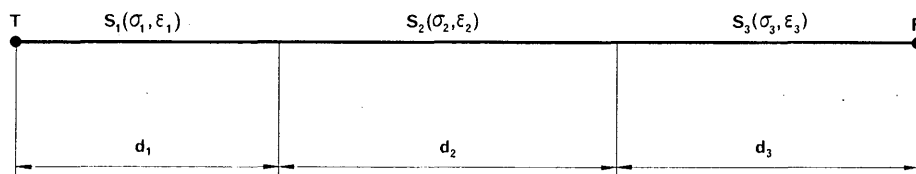
Les courbes de propagation ci-jointes s'appliquent à des fréquences inférieures à 10 MHz.

Ces courbes appellent les observations ci-après:

1. elles ont été établies pour un sol régulier homogène;
2. il n'est pas tenu compte des effets de la troposphère sur ces fréquences;
3. on a supposé que l'émetteur et le récepteur étaient tous deux situés sur le sol. Les effets de l'augmentation du gain en fonction de la hauteur peuvent être extrêmement importants dans le cas des auxiliaires de la navigation pour les avions volant à haute altitude, mais il a été décidé de ne pas tenir compte de ces effets pour le moment;
4. les courbes se rapportent aux conditions suivantes:
 - elles sont calculées pour la composante verticale du champ électrique d'après l'analyse rigoureuse de van der Pol et Bremmer;
 - l'émetteur est un doublet électrique vertical idéal de Hertz, auquel une antenne verticale de longueur inférieure au quart d'onde est presque équivalente;

- le moment de ce doublet est choisi de telle manière que le doublet rayonnerait une puissance de 1 kW si la Terre était un plan infini parfaitement conducteur, auquel cas le champ rayonné aurait, à 1 km de distance, une valeur de $3 \times 10^5 \mu\text{V/m}$;
 - les courbes sont tracées pour des distances mesurées autour de la surface courbe de la Terre;
 - la courbe « A » intitulée « inverse de la distance », à laquelle les courbes sont asymptotiques pour les courtes distances, passe par la valeur de champ de $3 \times 10^5 \mu\text{V/m}$ pour une distance de 1 km;
5. l'affaiblissement de propagation défini à l'Avis 341 pour l'onde de sol peut être déterminé d'après les valeurs de champ en dB ($\mu\text{V/m}$) indiquées par les courbes ci-jointes, en utilisant l'équation (19) du Rapport 112;
 6. en règle générale, les courbes ne devraient être utilisées pour déterminer le champ que dans le cas où l'on peut prévoir, avec certitude, une amplitude négligeable des réflexions ionosphériques pour la fréquence en question, par exemple lorsqu'il s'agit de la propagation de jour dans la bande comprise entre 150 kHz et 2 MHz et pour les distances inférieures à 2000 km environ. Toutefois, dans des conditions où le champ de l'onde d'espace est comparable ou supérieur à celui de l'onde de sol, les courbes demeurent applicables lorsque l'effet de l'onde de sol peut être séparé de celui de l'onde d'espace au moyen d'émissions par impulsions, comme c'est le cas pour certains systèmes de radiogoniométrie et d'aide à la navigation;
 7. les courbes sont applicables à la détermination de la propagation sur des trajets mixtes (au-dessus d'un sol régulier hétérogène), de la façon suivante:

Ces trajets peuvent être constitués de sections S_1, S_2, S_3 , etc. de longueurs d_1, d_2, d_3 , etc., ayant des conductivités et des constantes diélectriques respectives $\sigma_1, \epsilon_1; \sigma_2, \epsilon_2; \sigma_3, \epsilon_3$, etc., comme le montre le schéma ci-dessous pour trois sections:



Parmi les diverses méthodes semi-empiriques permettant de déterminer la propagation sur de tels trajets, celle due à Millington [1949] est la plus précise et satisfait à la condition de réciprocité. Avec cette méthode on présume que l'on dispose des courbes qui s'appliquent aux différents types de terrain correspondant aux sections S_1, S_2, S_3 , etc., supposées individuellement homogènes, et se rapportant toutes à la même source T définie, par exemple, par une courbe « inverse de la distance ». Les valeurs pour toute autre source pourront ainsi être obtenues par l'application d'un coefficient.

On choisit, pour une fréquence donnée, la courbe correspondant à la section S_1 et l'on relève le champ $E_1(d_1)$ en dB($\mu\text{V/m}$) pour la distance d_1 . La courbe correspondant à la section S_2 permet de déduire ensuite les champs $E_2(d_1)$ et $E_2(d_1 + d_2)$ puis on trouve, de façon similaire, à l'aide de la courbe s'appliquant à la section S_3 , les champs $E_3(d_1 + d_2)$ et $E_3(d_1 + d_2 + d_3)$ et ainsi de suite.

Le champ à la réception E_R est alors défini par l'expression:

$$E_R = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3)$$

On inverse alors le processus en appelant R l'émetteur et T le récepteur; on obtient ainsi un champ E_T défini par l'expression:

$$E_T = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1)$$

Le champ requis est donné par $\frac{1}{2} [E_R + E_T]$, la manière d'étendre le calcul à un nombre plus grand de sections étant évidente.

Cette méthode pourrait en principe être étendue aux changements de phase si l'on disposait des courbes correspondantes de la phase en fonction de la distance pour un sol homogène. Ces données seraient nécessaires pour l'application aux systèmes de navigation;

8. il convient de continuer à utiliser cet Avis jusqu'au moment où on aura pu le réviser conformément aux suggestions contenues dans le Rapport 428-1.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MILLINGTON, G. [1949] Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. I.E.E.* Part III, **96**, 53.

BIBLIOGRAPHIE

FURUTSU, K. [1955] Propagation of electro-magnetic waves over a flat earth across a boundary separating different media and coastal refraction. *J. Radio Res. Lab.*, Japon, **2**, 1.

GROSSKOPF, J. [1950] Zur Ausbreitung von Mittelwellen über inhomogenes Gelände (Propagation des ondes hectométriques sur terrain non homogène). *Fernmeldetech. FTZ*, **3**, 118.

MILLINGTON, G. et ISTEAD, G.A. [1950] Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. Part 2. Experimental Evidence and Practical Implications. *Proc. I.E.E.*, **97**, 209.

SENIOR, T.B.A. [1957] Radio propagation over a discontinuity in the earth's electrical properties: I and II coastal refraction. *Proc. I.E.E.*, Part C, **104**, 43, 139.

WATT, J.R. [1961] On the theory of mixed-path ground-wave propagation on a spherical earth. *NBS Journ. of Research*, **65D**, 401.

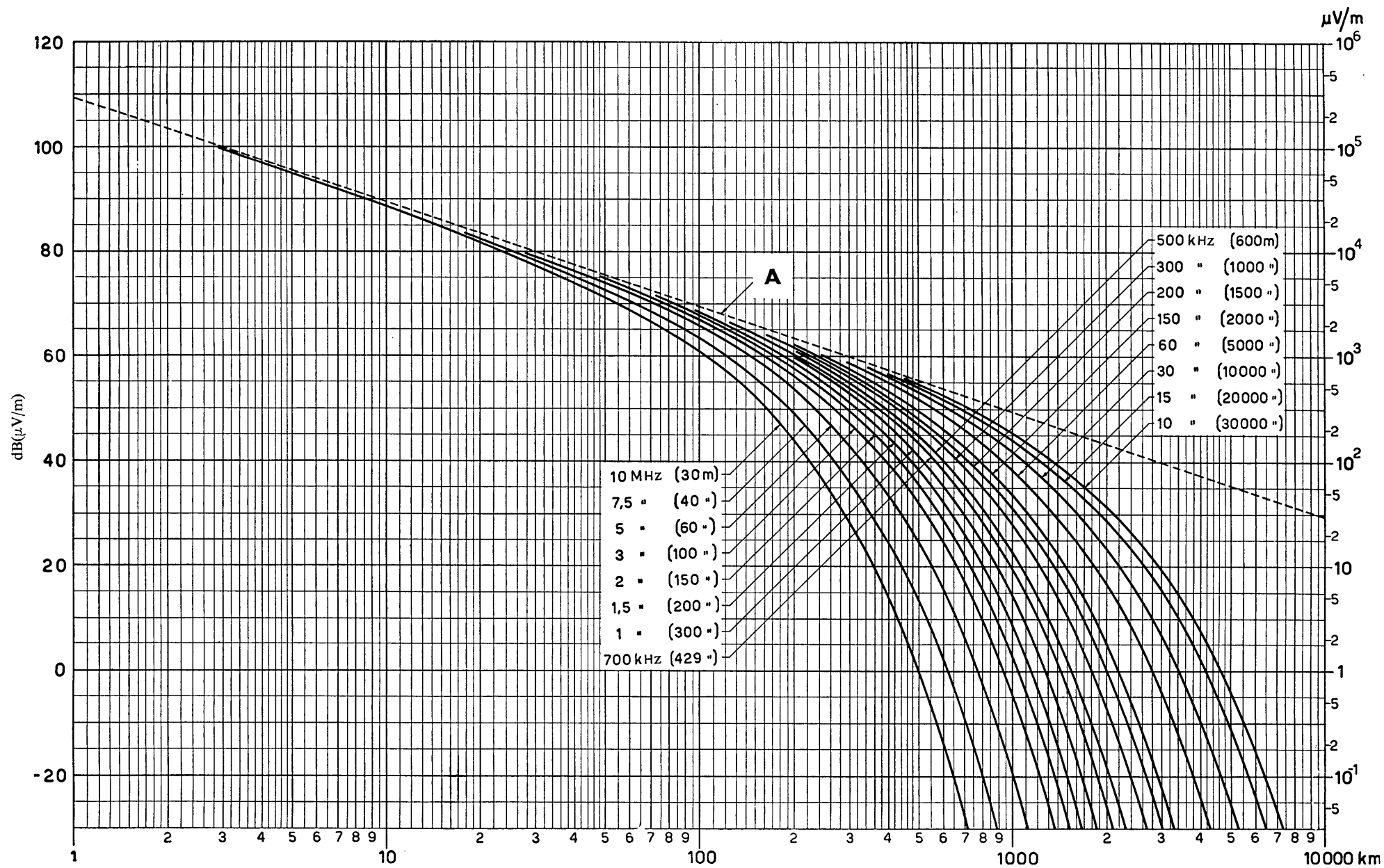


FIGURE 1

Courbes de propagation de l'onde de sol; mer, $\sigma = 4$ S/m, $\epsilon = 80$

A: Inverse de la distance

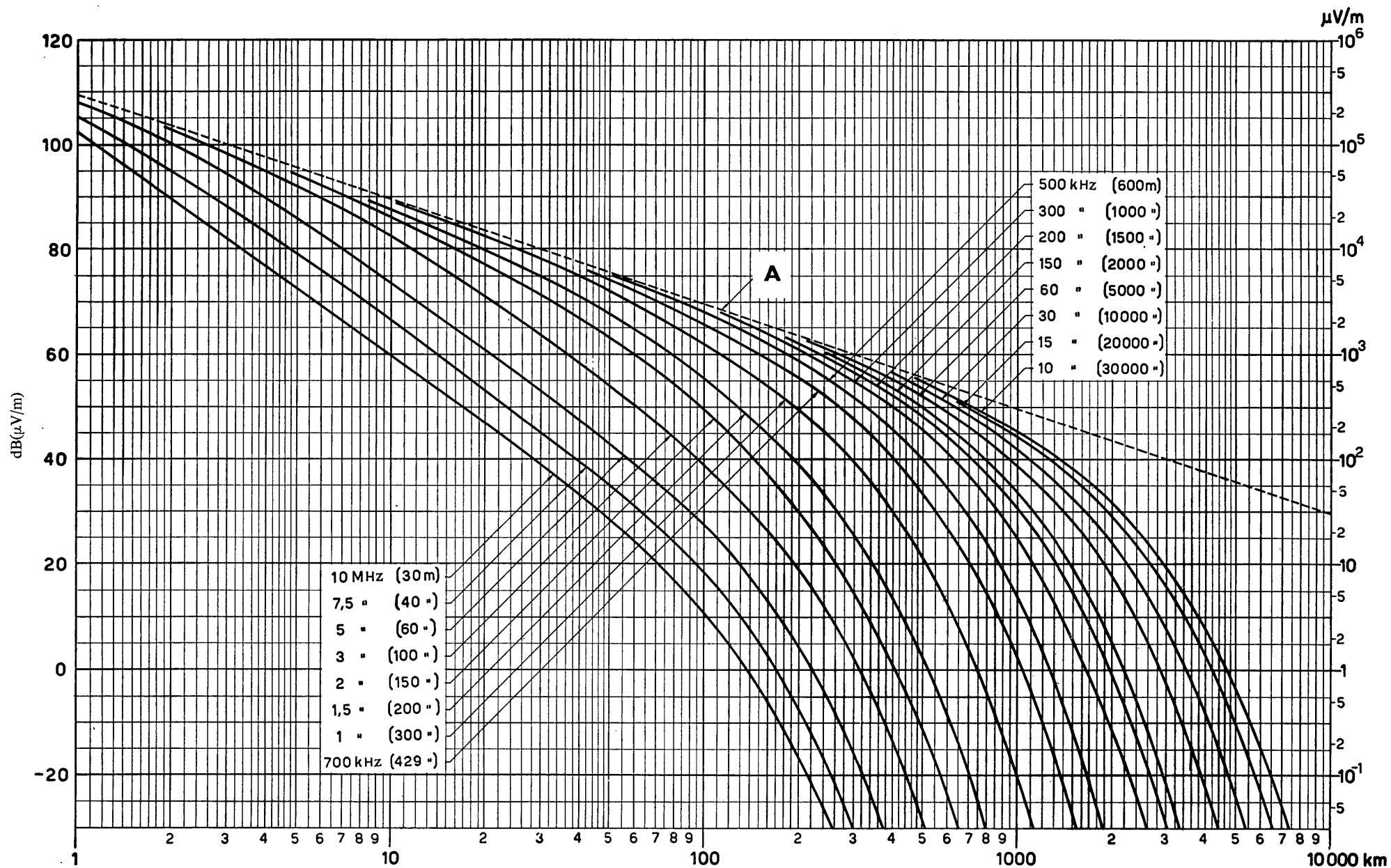


FIGURE 2

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-2} \text{ S/m}$, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

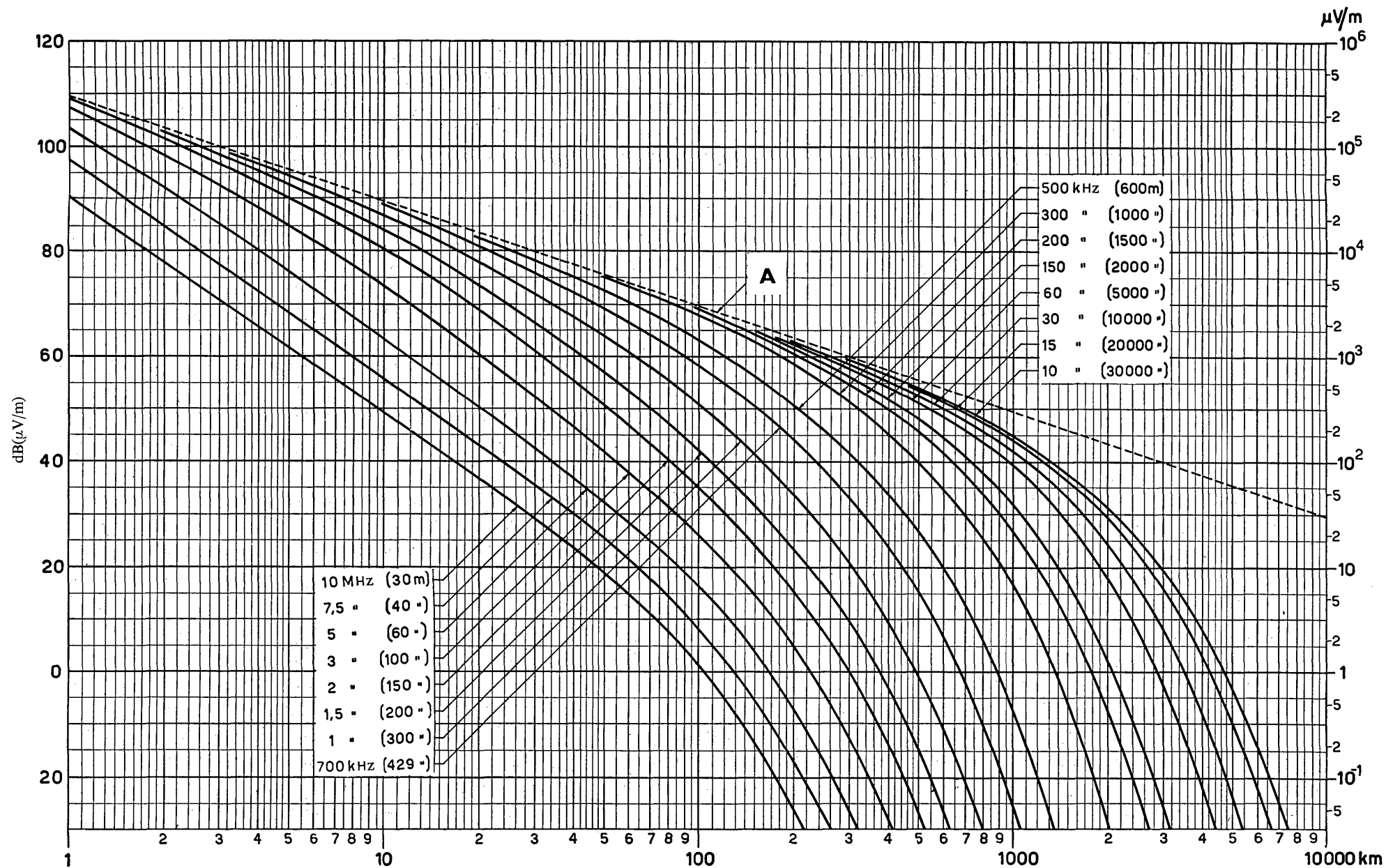


FIGURE 3

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 10^{-2}$ S/m, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

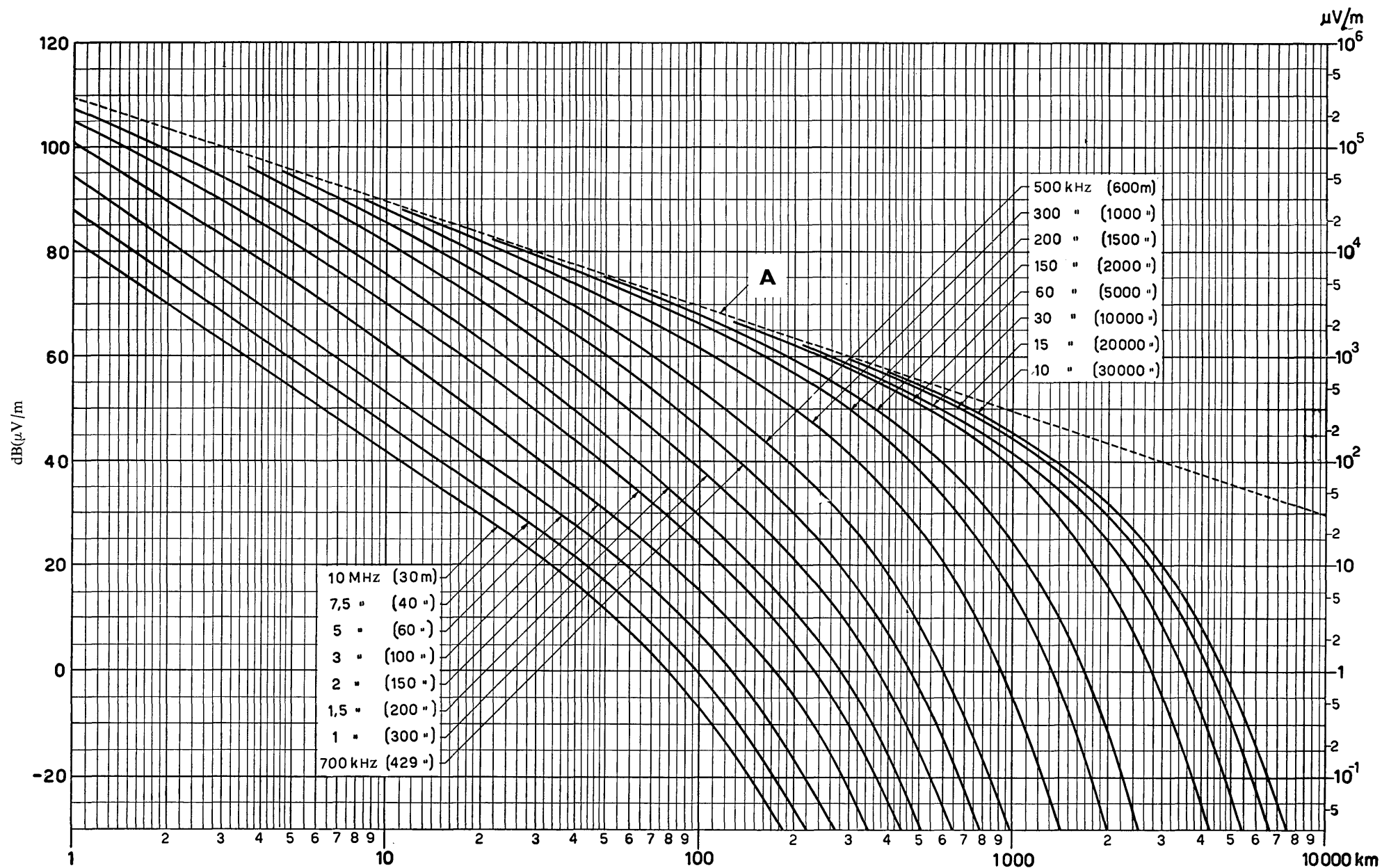


FIGURE 4

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-3} \text{ S/m}$, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

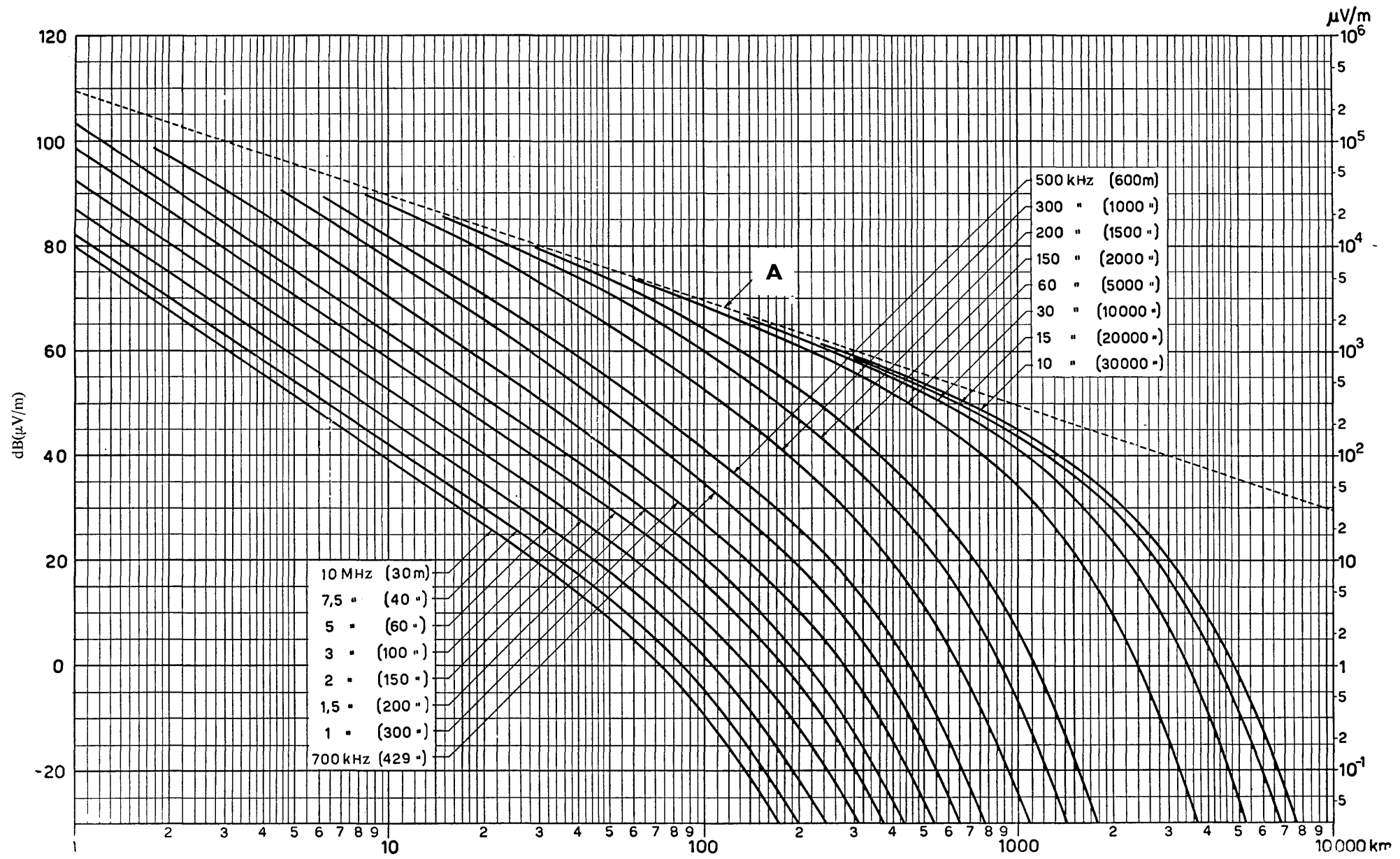


FIGURE 5

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

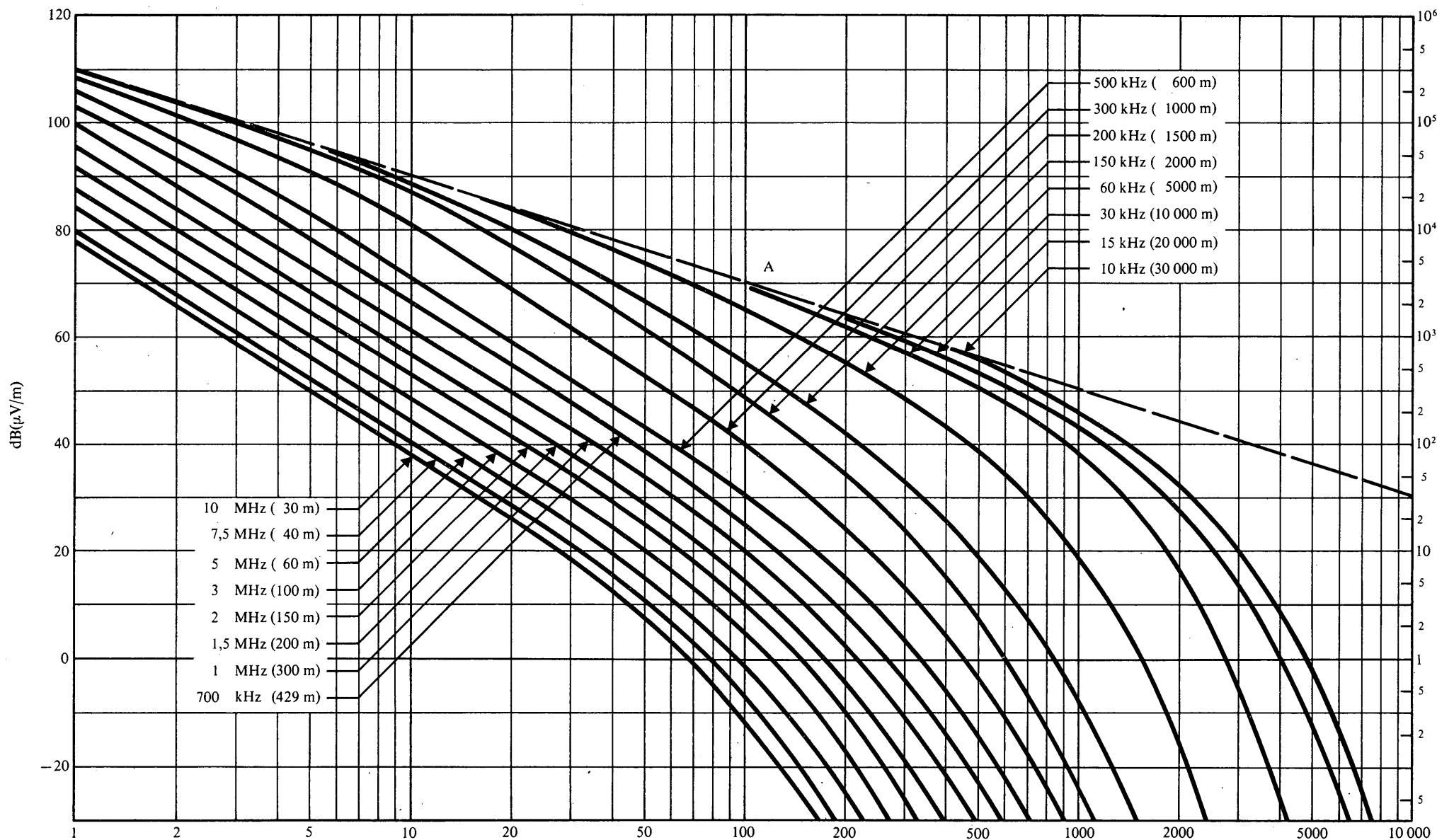


FIGURE 6

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

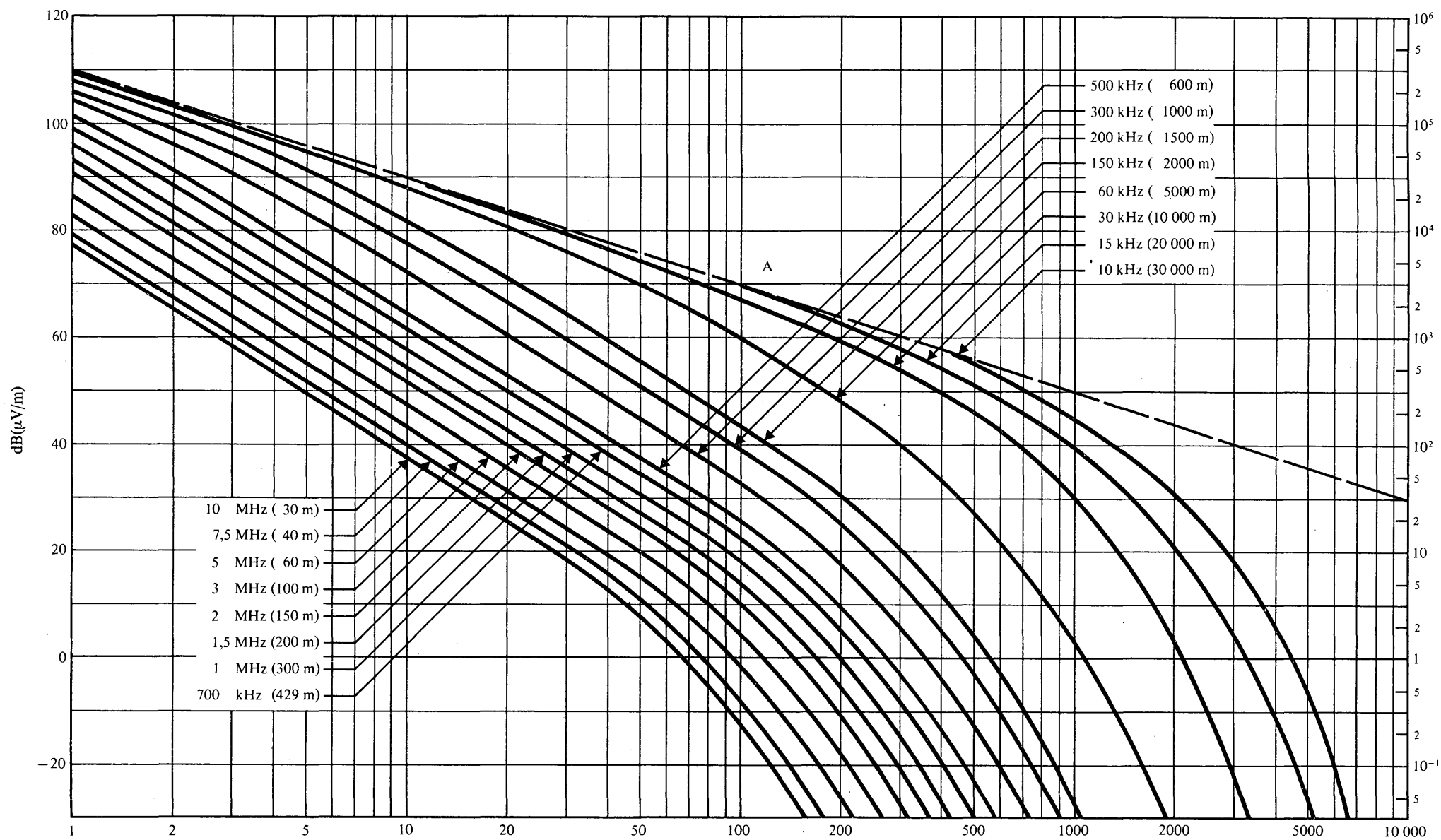


FIGURE 7

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

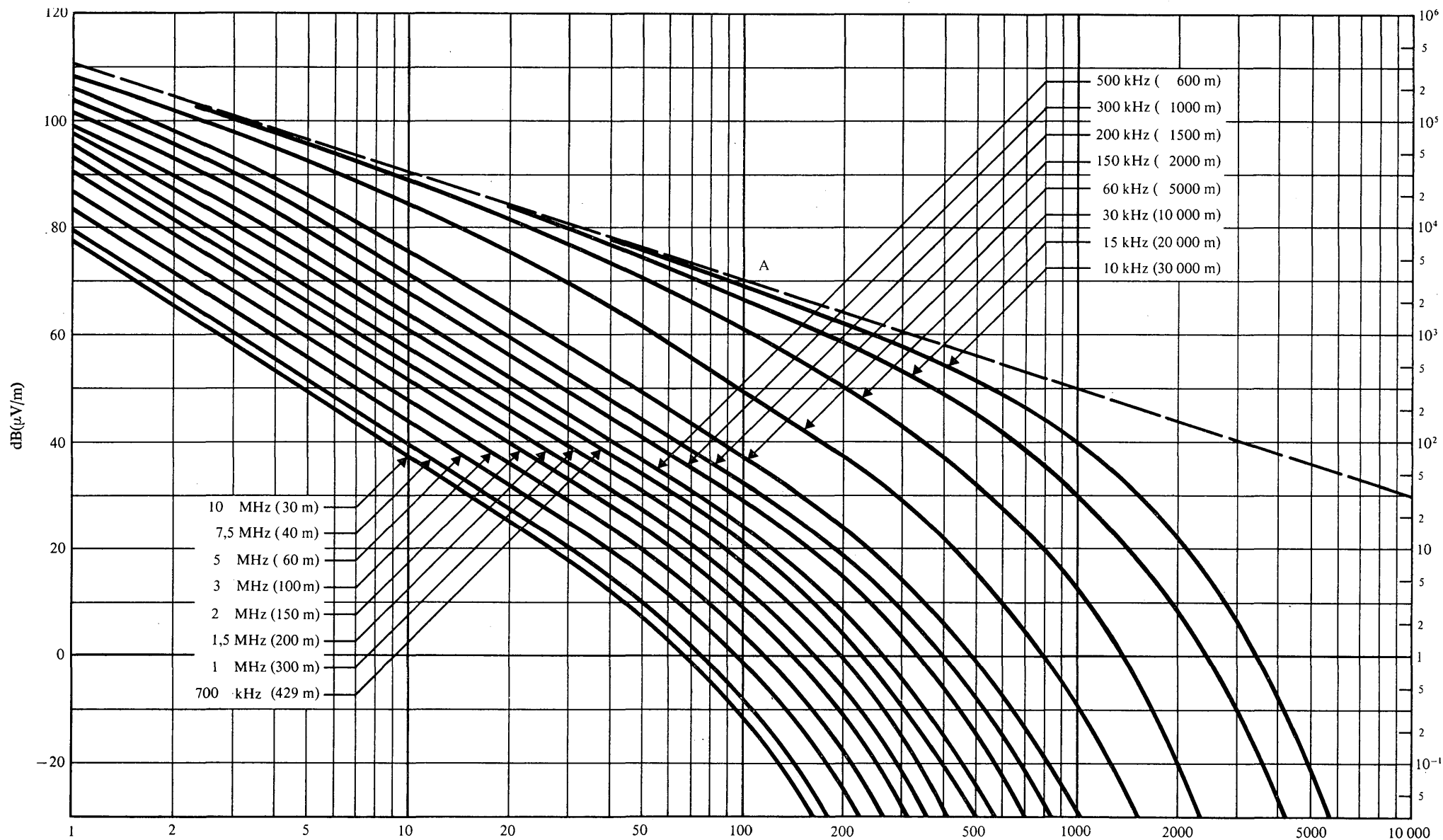


FIGURE 8

Courbes de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 3 \times 10^{-5}$ S/m, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

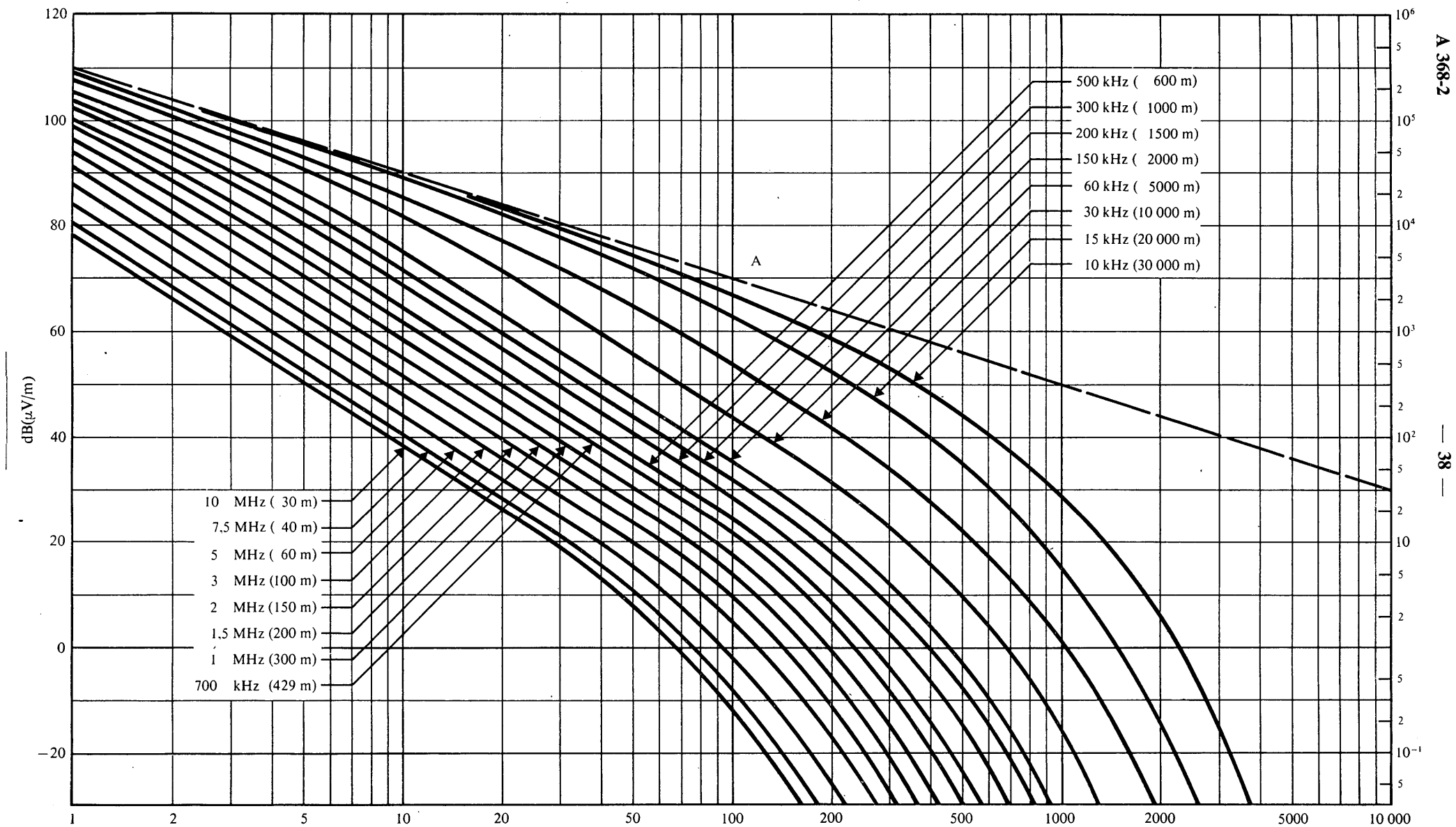


FIGURE 9

Courbe de propagation de l'onde de sol; Terre, $\sigma = 10^{-5} \text{ S/m}$, $\epsilon = 4$

A: Inverse de la distance

5B: *Rapports*

RAPPORT 229-2 *

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DE LA SURFACE DE LA TERRE

(Question 1-2/5)

(1959 – 1963 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Ce Rapport discute les facteurs physiques dont dépendent les caractéristiques électriques de la surface de la Terre, passe en revue les méthodes qui ont été employées pour déterminer les constantes du sol et donne une appréciation sur la valeur de ces méthodes par rapport aux procédés de calculs de la propagation radioélectrique: on trouvera dans les documents de la XI^e Assemblée plénière du C.C.I.R., Oslo, 1966, Vol. II, page 74, une liste bibliographique des publications consacrées à ce problème.

2. Les caractéristiques du sol

Les propriétés électriques du sol ou de tout autre milieu peuvent s'exprimer par trois constantes qui sont la perméabilité relative, la constante diélectrique et la conductivité. On peut considérer que la perméabilité relative est normalement égale à l'unité; les problèmes de propagation ne font donc intervenir que la constante diélectrique et la conductivité. Ces deux constantes influent l'une et l'autre sur la propagation des ondes conformément à l'expression suivante qui donne, par rapport au vide, la constante diélectrique complexe:

$$\epsilon' = \epsilon - j \, 18 \, 000 \, \sigma / f = \epsilon - j \, 60 \, \sigma \lambda$$

σ étant exprimée en S/m, f étant la fréquence en MHz, λ la longueur d'onde dans l'espace libre en mètres et le facteur de temps $\exp(j\omega t)$ étant sous-entendu. On peut noter que les densités des courants de déplacement et de conduction sont, entre elles, dans le même rapport que ϵ et $60 \, \sigma \lambda$, ce qui permet de juger de leur importance relative. Les Fig. 1 et 2 donnent des valeurs typiques des constantes du sol en fonction de la fréquence. Aux fréquences supérieures à 100 MHz, on constate une variation de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, ainsi que de la conductivité globale (dipolaire et ionique) [Saxton et Lane, 1952]. On notera, de plus, que l'on a souvent utilisé une valeur de 80 pour la constante diélectrique de l'eau de mer dans une gamme étendue de fréquences. Or cette valeur est incorrecte, sauf lorsqu'il s'agit de basses températures et de fréquences inférieures à environ 1 GHz. La valeur réelle, même pour des fréquences relativement basses, dépend de la température et de la composition de l'eau de mer.

Les valeurs de la conductivité indiquées pour les types de surface spécifiés dans les Fig. 1 et 2 sont des valeurs moyennes. Etant donné les différences que l'on constate dans les diverses parties du monde, la conductivité peut varier d'une façon considérable. Les valeurs les plus élevées sont applicables aux régions fertiles, tandis que pour les régions montagneuses et les régions arctiques la conductivité aux fréquences inférieures à 100 MHz peut s'abaisser jusqu'à 10^{-5} S/m. L'eau des lacs et des fleuves présente une conductivité qui augmente avec la teneur en impuretés.

3. Facteurs influant sur la valeur des constantes du sol

La valeur équivalente des constantes du sol dépend, non seulement de la nature du sol, mais aussi de sa teneur en humidité et de sa température; les autres facteurs qui interviennent sont la fréquence, la structure géologique générale du terrain, ainsi que la profondeur équivalente de pénétration et l'étalement latéral des ondes. Il faut aussi tenir compte de l'absorption d'énergie par la végétation, les bâtiments et autres objets à la surface du sol.

* Adopté à l'unanimité.

3.1 *Nature du sol*

De nombreuses mesures ont permis d'établir que les constantes varient avec la nature du sol; il semble cependant probable que cette variation est due, moins à la composition chimique du sol qu'à ses propriétés d'absorption et de rétention de l'humidité. La conductivité de l'argile est normalement de l'ordre de 10^{-2} S/m; or, on a pu montrer que, pour l'argile séchée, la conductivité peut descendre jusqu'à 10^{-4} S/m, c'est-à-dire à une valeur du même ordre que celle du granit.

3.2 *Teneur en humidité*

La teneur du sol en humidité est probablement le paramètre qui influe le plus sur la valeur de ses constantes électriques. Des mesures effectuées en laboratoire ont montré que, si l'on fait croître la teneur en humidité à partir d'une faible valeur, les constantes augmentent rapidement et deviennent maximales pour des teneurs en humidité voisines de celles qu'on rencontre normalement dans les sols réels correspondants. Il semble que, en un lieu donné, l'humidité du sol reste très sensiblement constante toute l'année à des profondeurs égales ou supérieures à 1 m; il peut y avoir une augmentation de cette humidité pendant les chutes de pluie, mais une fois que la pluie a cessé, l'écoulement des eaux ainsi que l'évaporation en surface ont tôt fait de la ramener à sa valeur normale. Toutefois, un même sol peut présenter des variations d'humidité considérables d'un lieu à un autre, par suite des différences entre les structures géologiques générales ayant, comme conséquence, un écoulement plus ou moins rapide des eaux.

3.3 *Température*

Des mesures de laboratoire portant sur les constantes du sol ont montré que, aux fréquences basses, le coefficient de température de la conductivité est de l'ordre de 2 % par degré centigrade; ce coefficient est négligeable dans le cas de la constante diélectrique. Au point de congélation de l'eau, on observe généralement une substantielle diminution de la valeur des deux constantes. Bien que les variations dont il s'agit soient appréciables, il convient de se rappeler que la température varie annuellement dans des limites de plus en plus étroites lorsque la profondeur augmente, aussi est-il vraisemblable que la température n'a une influence notable qu'aux fréquences élevées, pour lesquelles la pénétration des ondes est faible (voir le § 3.5), ou encore lorsque le sol est gelé sur une grande profondeur.

3.4 *Fréquence*

Des mesures de laboratoire sur des échantillons de sol ont montré qu'il y a une variation des constantes avec la fréquence qui dépend sensiblement de sa teneur en humidité. Cette variation est particulièrement marquée au-delà de 1 GHz, comme le montrent les Fig. 1 et 2. Dans le cas de l'eau douce et de l'eau de mer, on peut se fonder sur les renseignements contenus dans l'ouvrage [Saxton et Lane, 1952] pour calculer les valeurs correspondant à une fréquence quelconque.

3.5 *Structure géologique générale*

D'une manière générale, les terrains au-dessus desquels s'effectue la propagation ne sont pas homogènes et les constantes équivalentes dépendent donc de plusieurs types de sol différents. C'est pourquoi il est important de connaître exactement la structure géologique d'ensemble de la région qu'on étudie. Dans une zone donnée, ou le long d'un parcours donné, les constantes équivalentes dépendent, non seulement de la nature des sols formant la couche superficielle, mais aussi des couches sous-jacentes. Ces dernières peuvent faire partie du milieu que traversent les ondes; elles peuvent avoir encore une influence indirecte, en déterminant le niveau des eaux dans les couches supérieures.

3.6 *Pénétration et étalement des ondes*

La mesure dans laquelle les couches inférieures du sol influent sur la valeur de ses constantes électriques dépend de la profondeur de pénétration de l'énergie radioélectrique, δ , que l'on définit comme celle à laquelle l'intensité de l'onde est affaiblie dans le rapport $1/e$ (soit 37 %) de la valeur qu'elle avait à la surface. La profondeur de pénétration dépend des constantes électriques du sol et de la fréquence. La Fig. 3 donne ces valeurs en fonction de la fréquence pour des valeurs moyennes des constantes électriques du sol.

La Fig. 3 montre que la profondeur de pénétration varie considérablement avec la fréquence. Aux fréquences inférieures (et sauf dans le cas de l'eau de mer), il convient de tenir compte des couches profondes jusqu'à 100 m ou davantage. Ce fait est d'une importance particulière lorsque les couches supérieures ont une conductivité plus faible et que l'énergie peut pénétrer plus aisément dans les couches inférieures.

L'énergie radioélectrique reçue en un point donné ne s'est pas propagée uniquement le long du parcours qui relie directement ce point à l'émetteur; elle s'est propagée également sur un grand nombre de parcours indirects répartis de part et d'autre du précédent. Il faut donc considérer les constantes du sol, non seulement le long du parcours direct lui-même, mais aussi dans tout le domaine où se produit l'étalement latéral des ondes. Il n'est pas possible d'assigner des limites précises à ce domaine; on a cependant émis l'hypothèse qu'il coïncide, en fait, avec la première zone demi-onde de Fresnel, c'est-à-dire avec l'ellipse dont les foyers sont situés à l'émetteur et au récepteur et dont les axes sont respectivement $(D + \lambda/2)$ et $\sqrt{D\lambda}$, D étant la longueur du trajet direct et λ la longueur d'onde.

3.7 *Absorption de l'énergie par les objets à la surface de la Terre*

Les objets se trouvant à la surface de la Terre n'influent pas directement sur la valeur des constantes du sol, mais ils peuvent participer dans une mesure importante à l'affaiblissement des ondes de sol; on peut tenir compte de ces pertes d'énergie en utilisant dans les calculs de propagation des valeurs des constantes du sol modifiées de façon appropriée.

On obtient des valeurs particulièrement élevées de l'affaiblissement lorsque la transmission se fait au-dessus d'un terrain boisé, comme le montre la Fig. 4 [Blomquist, 1958; Rice, 1971; Saxton et Lane, 1955; Tamir, 1967]. Cet affaiblissement peut être encore plus grand lorsque les arbres sont couverts de neige mouillée ou lorsque leurs feuilles sont mouillées par la pluie.

4. Méthodes de mesure des constantes du sol

Les méthodes ci-après ont été employées pour mesurer une des constantes ou les deux.

4.1 *Mesure de laboratoire sur des échantillons de sol*

Pour déterminer la valeur de la constante diélectrique et de la conductivité d'échantillons de sol, on mesure la résistance et la réactance de condensateurs dont ces échantillons constituent le diélectrique. On a employé cette méthode pour des mesures sur l'eau de mer et sur un grand nombre de sols différents, y compris des roches, principalement aux fréquences comprises entre 1 kHz et 10 MHz.

4.2 *Mesure de la résistivité du sol par utilisation de sondes*

Pour connaître la conductivité, on mesure, sur le terrain, la résistance entre des sondes qu'on enfonce dans le sol. De telles mesures sont effectuées le plus souvent en courant continu, avec un système de quatre sondes; on fait passer un courant entre deux de ces sondes et on mesure la différence de potentiel qui en résulte entre les deux autres. La profondeur jusqu'à laquelle ces mesures donnent des résultats significatifs dépend de l'espacement entre les sondes; en effectuant une série de mesures avec des espacements différents, on pourra déterminer l'épaisseur de la couche superficielle ou la hauteur de la nappe aquifère.

On a encore obtenu la conductivité en mesurant l'impédance mutuelle entre deux lignes parallèles, posées à la surface du sol ou immédiatement au-dessus de cette surface et dont les extrémités sont mises à la terre.

4.3 *Méthode utilisant l'inclinaison des ondes*

Le principe de cette méthode repose sur le fait que les pertes à la surface du sol donnent naissance à une faible composante radiale du vecteur champ électrique. En général, ce champ est polarisé elliptiquement et le grand axe de l'ellipse est incliné vers l'avant en raison du flux de puissance qui pénètre dans le sol. Cette méthode exige une mesure précise du rapport des axes et de l'inclinaison de l'ellipse vers l'avant, à l'aide d'un dipôle orientable. Lorsque la surface du sol n'est pas horizontale, il convient de mesurer l'angle d'inclinaison vers l'avant par rapport à la normale à la surface et non par rapport à la verticale. On a indiqué que, si cette méthode est mise en œuvre de façon appropriée, elle permet de mesurer les constantes du sol dans une gamme de fréquences allant de 100 kHz à 40 MHz.

La méthode utilisant l'inclinaison des ondes a été employée avec succès pour mesurer les non-homogénéités de la surface terrestre dans le sens horizontal. On commet toutefois des erreurs lorsque les mesures sont faites au voisinage de régions caractérisées par d'importants gradients horizontaux de conductivité, comme dans le cas du passage de la terre à la mer ou du passage d'un sol meuble à un sol marécageux.

4.4 *Mesure de l'affaiblissement de l'onde de sol*

On mesure l'affaiblissement d'une onde de sol en fonction de la distance et on déduit la conductivité du sol en comparant les résultats avec des courbes de propagation tirées de théories rigoureuses ou de méthodes semi-empiriques considérées comme acceptables dans le cas considéré. La méthode est applicable à toutes les fréquences.

4.5 *Affaiblissement en fonction de la profondeur au-dessous de la surface du sol*

Les constantes du sol peuvent être déterminées en mesurant le taux relatif d'affaiblissement du champ avec un récepteur, lorsqu'on l'abaisse au-dessous de la surface de la Terre dans un puits ou un autre orifice convenable [Kachprovski, 1959].

4.6 *Mesure de la variation de phase (fréquences basses)*

Ayant mesuré la variation de la phase d'une onde de sol en fonction de la distance, on peut déduire du taux de cette variation la conductivité au-dessus d'un sol homogène. Cette méthode n'a été employée, jusqu'ici, qu'en ondes kilométriques; elle s'est révélée plus sensible que celle de la mesure des affaiblissements pour localiser des zones de discontinuité dans le terrain.

4.7 *Dispersion des ondes due aux brouillages atmosphériques (fréquences basses)*

Lorsqu'une impulsion, comme celles produites par certaines décharges de foudre, se propage au-dessus de la surface terrestre, la forme de l'onde est modifiée en ce sens que l'impulsion se trouve étirée à mesure que l'onde se propage. L'importance de cette dispersion dépend de la conductivité. S'il est possible de mesurer la forme de l'onde en deux points alignés avec la source, dont l'un soit assez voisin de celle-ci et l'autre éloigné, on peut établir une relation entre les changements observés et la dispersion calculée, pour plusieurs valeurs de la conductivité d'un sol homogène équivalent. Cette méthode est plus particulièrement indiquée pour les fréquences basses et pour des trajets dont la longueur est comprise entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de kilomètres.

4.8 *Mesure du coefficient de réflexion (fréquences très élevées)*

Pour mesurer sur le terrain le coefficient de réflexion du sol, on emploie des méthodes comportant un rayonnement à incidence normale. Les résultats permettent d'obtenir à la fois la constante diélectrique et la conductivité, cette dernière étant toutefois déterminée avec moins de précision. La méthode ne convient que pour les fréquences très élevées.

5. *Application des méthodes précédentes aux problèmes de propagation*

L'étude des méthodes précédentes et des facteurs dont dépend la valeur des constantes du sol montre clairement que la plupart de ces méthodes ne fournissent pas tous les renseignements nécessaires pour des calculs de propagation et que, dans certains cas, il faut effectuer toute une série de mesures.

Par exemple, les mesures en laboratoire portant sur des échantillons de sol pourront donner des renseignements précis et détaillés sur les constantes du sol dans les conditions naturelles, mais à condition que les échantillons soient en très grand nombre et qu'ils aient été prélevés aussi bien le long du trajet de propagation qu'en profondeur. Il faut encore connaître avec précision la structure géologique du sol le long du trajet, si l'on veut être à même d'utiliser les résultats de mesure pour en déduire la valeur des constantes du sol. Il est probable que cette méthode convient mieux à l'étude des variations possibles des constantes et des paramètres dont elles dépendent qu'à la détermination des caractéristiques d'un trajet donné.

La méthode par mesure de la résistivité tient mieux compte de la structure générale du terrain, mais seulement sur une surface relativement petite. Cette méthode est simple et commode à mettre en œuvre; c'est peut-être celle qui convient le mieux dans les cas où on n'a besoin de connaître les caractéristiques du sol qu'au voisinage immédiat de l'émetteur ou du récepteur. Elle donne immédiatement la valeur des constantes à différentes profondeurs; cependant, pour évaluer l'affaiblissement dû au trajet, il faut faire des mesures en un certain nombre de points le long de ce parcours, leurs distances mutuelles dépendant de la stratification verticale du terrain.

La méthode qui repose sur la mesure de l'inclinaison des ondes tient compte, elle aussi, de la structure du terrain autour du point de mesure et donne la valeur des constantes équivalentes correspondant à la fréquence utilisée. Les résultats des mesures sont erronés au voisinage de régions caractérisées par un important gradient de conductivité ou au voisinage d'objets très conducteurs placés à la surface du sol ou enterrés. Les mesures ne devraient pas être faites trop près de l'antenne d'émission, la distance minimale à respecter étant de l'ordre de 10 longueurs d'onde pour les fréquences basses et moyennes ou une distance qui soit grande par rapport aux dimensions de l'antenne pour les fréquences élevées. La méthode devient assez peu précise au-dessous de 100 kHz, car on a affaire alors à de petits angles d'inclinaison. Du fait de la variation de l'inclinaison en fonction de la hauteur au-dessus de la surface du sol, cette méthode n'est utile que pour des fréquences inférieures à environ 40 MHz.

Elle peut être utilisée pour la détermination de l'affaiblissement le long du trajet si l'on procède à une série de mesures le long de ce trajet. La méthode par mesure de l'affaiblissement de l'onde de sol est l'une de plus complètes, étant donné qu'elle tient compte de tous les facteurs en jeu. Comme la méthode décrite au paragraphe précédent, elle permet de déterminer les variations des constantes du sol le long d'un trajet si l'on procède à une série de mesures le long de ce trajet. Cependant, les résultats sont probablement moins précis que ceux obtenus avec les méthodes qui reposent sur la mesure de la résistivité du sol ou de l'inclinaison des ondes. De plus, les résultats ne sont valables que pour le parcours considéré ou pour un parcours de caractéristiques très voisines. La méthode se prête mal à la mesure précise des constantes du sol sur certaines zones de faible étendue.

La méthode de la variation de phase tient compte, elle aussi, de tous les paramètres en jeu ; il semble, en outre, qu'elle puisse donner des renseignements plus détaillés que la méthode précédente en ce qui concerne les trajets non homogènes. Par contre, elle présente l'inconvénient d'exiger une liaison auxiliaire en ondes métriques ou décimétriques comme référence de phase pour les récepteurs.

Il faut prendre certaines précautions, dans les trois dernières méthodes, afin que le champ mesuré ne soit pas influencé par les ondes ionosphériques et que les hautes végétations n'influencent pas exagérément sur les résultats, à moins évidemment de vouloir étudier plus particulièrement cet effet (Fig. 4).

Les résultats fournis par la méthode du coefficient de réflexion ne sont valables que dans une petite zone de terrain autour du point de mesure ; d'autre part, comme on ne peut employer cette méthode qu'aux fréquences élevées, la profondeur du terrain sur laquelle portent les mesures est également très petite.

La méthode de dispersion est tout indiquée pour des trajets relativement longs et des fréquences basses ; elle trouve, par conséquent, sa principale application dans les systèmes de navigation à fréquence basse. La méthode offre l'avantage de ne pas exiger d'émetteur, mais elle présente également l'inconvénient de ne permettre de recueillir des données que très lentement, les décharges de foudre appropriées apparaissant de façon erratique et peu fréquemment. Cette méthode peut être appliquée quelle que soit la distance, car la méthode des impulsions permet de faire la distinction entre l'onde de sol et l'onde d'espace. Cette méthode exige un équipement plus compliqué et des calculs mathématiques plus complexes que les autres méthodes. Il semble qu'il soit nécessaire d'apporter encore des perfectionnements à cette méthode pour pouvoir surmonter certaines des difficultés indiquées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLOMQUIST, A. [1958] Local ground-wave field strength variations in the frequency range 30–1000 MHz. Proc. Conf. on Electromagnetic Wave Propagation, Bruxelles, 127.
- KACHPROVSKI, V. [1958] The propagation of radio waves and conductivity (en russe). *Radio Journal of U.S.S.R.* [juin 1959]. Traduction en anglais du National Bureau of Standards T1-60.
- RICE, P.L. [1971] Some effects of buildings and vegetation on VHF/UHF propagation. Conf. Proc. of the 1971 IEEE Mountain-West Conf. on Electromagnetic Compatibility, Tucson, Arizona.
- SAXTON, J.A. et LANE, J.A. [octobre 1952] Electrical properties of sea water. *Wireless Engineer*.
- SAXTON, J.A. et LANE, J.A. [1955] VHF and UHF reception. *Wireless World*, 61, 229.
- TAMIR, T. [1967] On radio-wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 15, 6, 806-817.

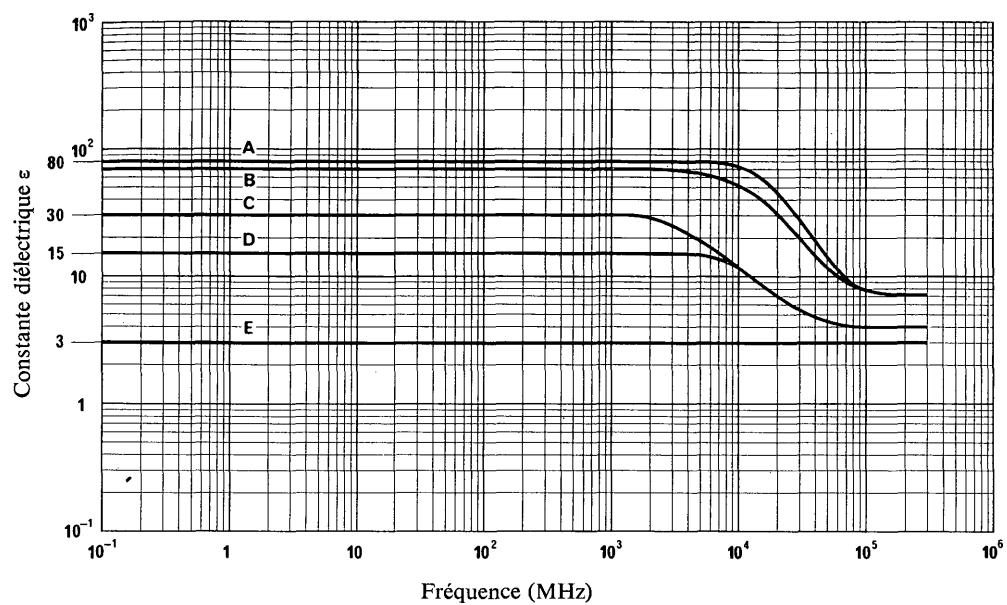


FIGURE 1

Constante diélectrique en fonction de la fréquence

- A : Eau douce et eau pure (20°C)
- B : Eau de mer (20°C)
- C : Sol humide
- D : Sol moyennement humide
- E : Sol très sec et glace

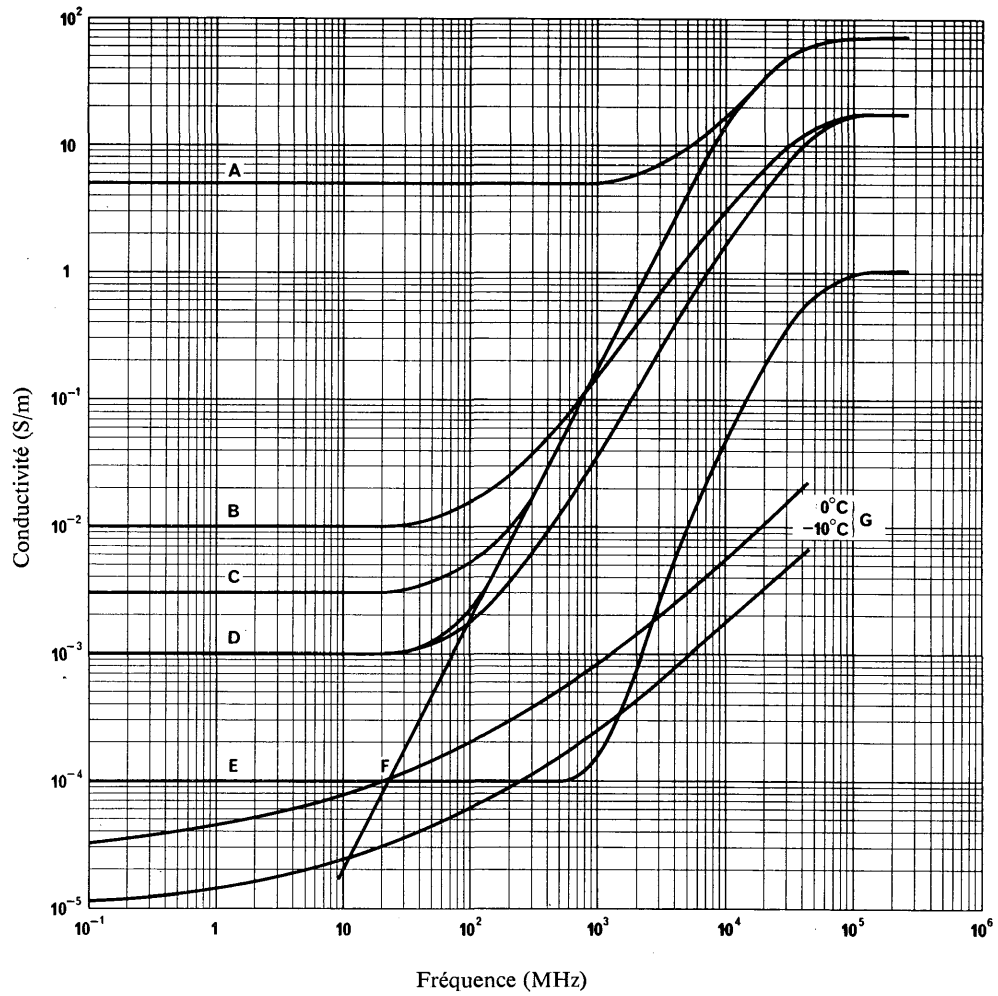


FIGURE 2

Conductivité en fonction de la fréquence

A : Eau de mer (salinité moyenne), 20° C

B : Sol humide

C : Eau douce, 20° C

D : Sol moyennement humide

E : Sol très sec

F : Eau pure, 20° C

G : Glace (eau douce)

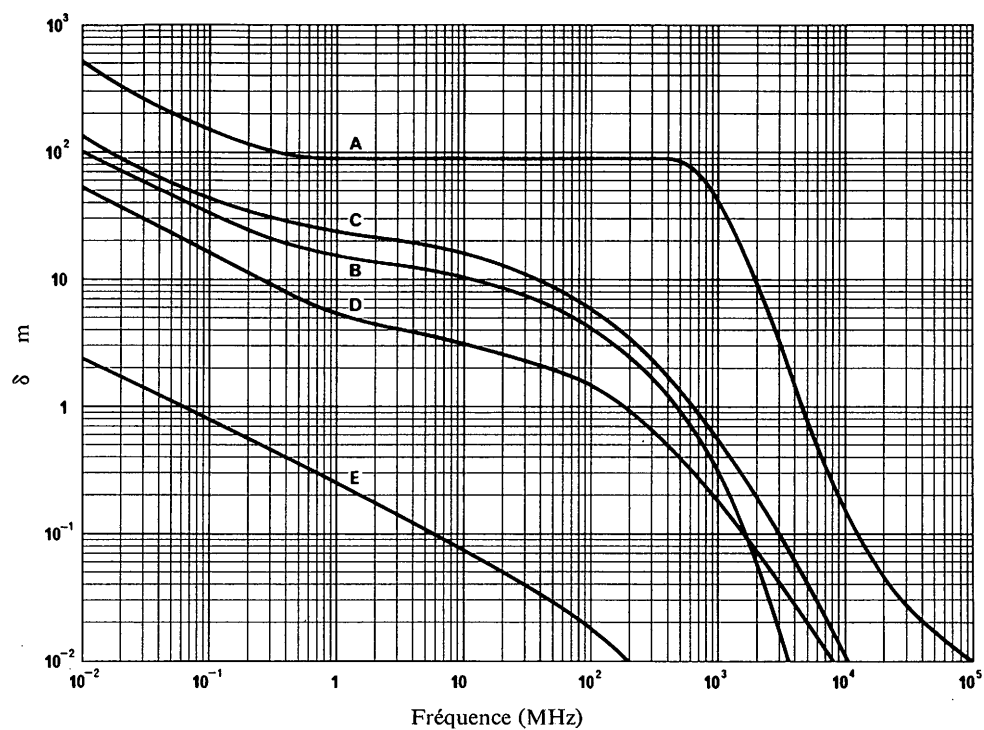


FIGURE 3

Profondeur de pénétration en fonction de la fréquence

- A : Sol très sec
- B : Eau douce
- C : Sol moyennement humide
- D : Sol humide
- E : Eau de mer

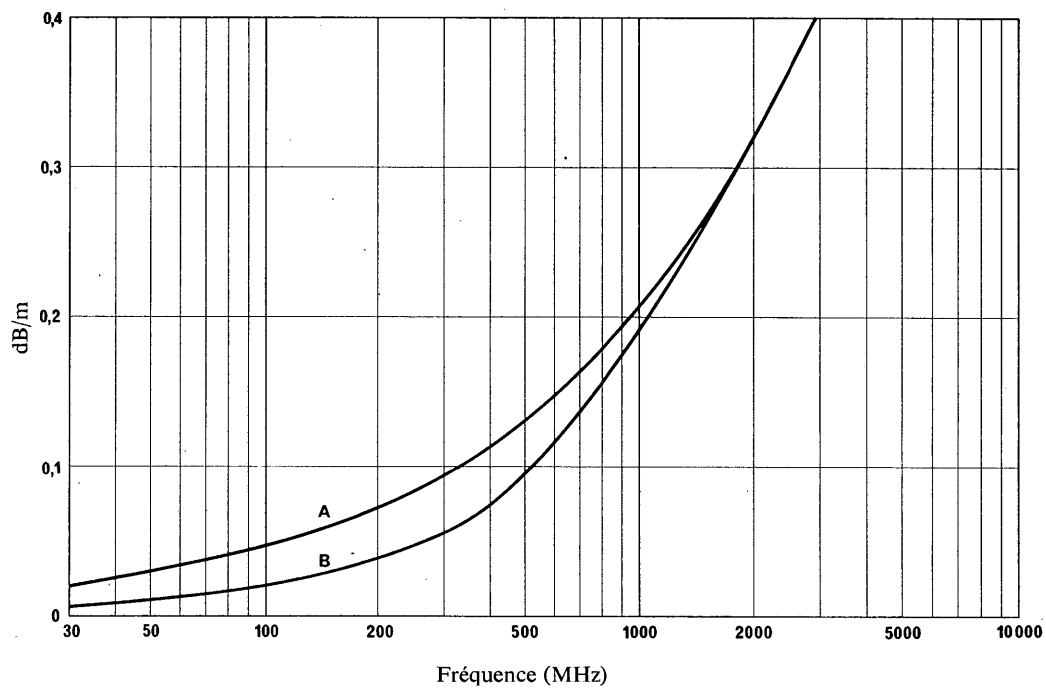


FIGURE 4

Affaiblissement supplémentaire sur terrain boisé

A: Polarisation verticale

B: Polarisation horizontale

RAPPORT 236-3 *

**INFLUENCE DES ACCIDENTS DE TERRAIN SUR
LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE**

(Programme d'études 1A-1/5)

(1951 – 1953 – 1956 – 1959 – 1963 – 1966 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Le présent Rapport a pour objet de décrire en termes généraux la façon dont les caractéristiques du terrain affectent les ondes radioélectriques en propagation troposphérique entre des antennes situées en des emplacements arbitraires séparés par un terrain irrégulier.

1.1 Caractéristiques électriques du sol

La propagation troposphérique dépend en principe des caractéristiques électriques du sol, comme l'expose en détail le Rapport 229-2. Cette influence va croissant au fur et à mesure que la fréquence s'abaisse. Cependant, aux fréquences les plus élevées, il est souvent difficile de distinguer l'effet de la non-homogénéité des constantes du sol de celui des accidents du terrain, lequel prédomine lorsque les dimensions des accidents du terrain sont importantes par rapport à la longueur d'onde.

1.2 Interaction du terrain et de la troposphère

Les Rapports 233-3, 234-3, 235-2, 238-2, 285-3 et 563 portent sur l'influence de la troposphère. De nombreux effets du terrain et de la troposphère sont étroitement liés les uns aux autres, mais il est commode de les distinguer autant que possible. On observe qu'une augmentation de la réfraction atmosphérique entraîne une augmentation de la diffraction à grande distance ou une augmentation des champs de diffusion vers l'avant, alors que sur les trajets plus courts elle peut conduire à des évanouissements dus à une propagation par trajets multiples. Une augmentation de la turbulence atmosphérique peut se traduire tantôt par une augmentation, tantôt par une diminution de l'affaiblissement de transmission, suivant la géométrie du trajet considéré et la prédominance de différents mécanismes de propagation associés à la stratification de la structure de l'indice de réfraction.

1.3 Comparaison entre les modèles idéalisés et les facteurs de terrain

Immédiatement au-delà de l'horizon radioélectrique d'une antenne d'émission, les champs radioélectriques observés proviennent d'une diffraction sur des crêtes, des collines ou sur la courbure de la surface terrestre. Un cas extrême est celui d'une diffraction sur des obstacles élevés et tellement isolés que la théorie de la diffraction sur une lame de couteau fournit des résultats théoriques concordant assez bien avec les observations (voir le § 2 du présent Rapport). Les champs peuvent être voisins de leur valeur en espace libre, ce qui traduit un taux d'affaiblissement peu élevé en fonction de la distance (voir le Rapport 570). L'autre cas extrême est celui d'une diffraction sur une terre sphérique régulière (voir le Rapport 568). Il lui correspond un champ de faible intensité dont la valeur est bientôt dépassée, lorsqu'on va au-delà de l'horizon d'une antenne d'émission, par celles des champs radioélectriques créés par réflexion sur les couches élevées ou par des ondes radioélectriques diffusées vers l'avant.

On a mis au point des méthodes théoriques pour idéaliser certaines particularités du terrain telles que les falaises plus ou moins à pic et des obstacles en arête de couteau se trouvant dans un trajet de propagation [Millington et autres, 1962; Furutsu, 1957, 1959 et 1963].

Mais, dans la plupart des cas de propagation sur trajet terrestre, on a constaté qu'il était extrêmement difficile de tenir compte de l'irrégularité et des accidents du terrain ainsi que des amas d'obstacles artificiels, tels que la végétation, les constructions, les ponts et les lignes à haute tension, sauf par le biais d'un « facteur de terrain » déterminé empiriquement. Ces facteurs, établis sous forme d'une fonction de paramètres reliant la longueur d'onde radioélectrique et la géométrie du trajet aux caractéristiques statistiques du terrain, sont étudiés dans le Rapport 239-3 qui est consacré aux données statistiques descriptives de propagation applicables au service de radiodiffusion et au service mobile.

* Adopté à l'unanimité.

1.4 *Prévision de la propagation entre points fixes et prévision des variations d'un trajet à un autre*

Le paramètre le plus important qui permet de faire la distinction entre les différents profils de terrain sur un grand cercle pour des trajets transhorizon d'une longueur donnée est généralement la distance angulaire θ . Cette dernière est par définition l'angle que font les rayons passant par l'horizon radioélectrique dans le plan du grand cercle contenant les antennes; c'est l'angle minimal de diffraction ou de diffusion, à moins que les faisceaux des antennes ne soient dirigés selon de grands angles d'élévation.

Cet angle, joint à la hauteur équivalente d'antenne réelle et aux autres paramètres mentionnés dans le présent Rapport, est utile pour prévoir les valeurs médianes de l'affaiblissement de transmission dans des liaisons par faisceaux hertziens entre points fixes. La variation de l'affaiblissement de transmission qui se produit d'un trajet à un autre parmi tous les trajets correspondant à un ensemble donné de valeurs de la fréquence, de la distance, de la distance angulaire et des hauteurs équivalentes d'antenne, est considérée comme faisant partie de l'erreur de prévision.

En revanche, la plupart des applications du service de radiodiffusion et du service mobile correspondent à un ensemble donné de valeurs de la fréquence, de la distance, des hauteurs d'antenne et des paramètres décrivant le terrain et le climat. La variation d'un trajet à un autre correspondant à cet ensemble de conditions fait par conséquent partie de la prévision et non de l'erreur de prévision.

1.5 *Durée de service utile*

Il est commode, pour la plupart des communications entre points fixes, de prévoir simplement la distribution cumulée, dans le temps, de la puissance reçue en provenance des sources de signaux utiles et brouilleurs, en tenant compte des valeurs estimées de la corrélation entre elles [NBS, 1967]. Comme la puissance des signaux utiles et brouilleurs varie généralement dans le même sens avec le jour et la saison, la distribution cumulée dans le temps du rapport signal/bruit s'étend sur un domaine un peu plus étroit que si cette corrélation positive n'existait pas.

On peut considérer qu'un service entre points fixes est exempt de brouillage quand le rapport des puissances signal disponible/bruit dépasse une valeur prédéterminée pendant un pourcentage de temps spécifié.

2. **Diffraction au-dessus d'obstacles isolés**

Certains trajets peuvent être considérés comme passant sur des crêtes successives qui peuvent être remplacées par des lames de couteau ou des cylindres suivant que les crêtes sont plus ou moins aiguës. Le cas d'une crête aiguë unique peut être traité au moyen des intégrales de Fresnel. Le problème des crêtes multiples peut être exprimé par des intégrales multiples du type de Fresnel et, dans le cas de deux crêtes, l'intégration est possible [Millington et autres, 1962]. La résolution des intégrales est plus difficile dans des cas complexes et on a élaboré une méthode approchée [Bauermeister et Knöpfel, 1952; Wilkerson, 1966] dans le cas d'un nombre quelconque de crêtes aiguës successives.

Sur les trajets de grande longueur, la diffusion troposphérique peut se produire bien au-dessus d'une crête de montagne et il faut alors combiner l'onde diffusée et l'onde diffractée. Lorsque les antennes d'émission et de réception sont placées plus haut que le terrain environnant, certaines ondes peuvent être réfléchies, tant avant qu'après la diffraction. Dans certains cas où une onde passe à proximité du sol, il peut se produire un affaiblissement de transmission supplémentaire qui est dû à la conductivité finie du sol [Furutsu, 1957 et 1959].

Les crêtes de montagnes peuvent réduire notablement l'affaiblissement de transmission et les évanouissements en dessous des valeurs auxquelles on pourrait s'attendre en l'absence d'obstacle. Cela se produit lorsque le trajet direct n'est pas un trajet à portée optique, l'émetteur et le récepteur étant cependant visibles depuis la crête de la montagne. Ce phénomène est appelé gain d'obstacle [Dickson et autres, 1953; Norton et autres, 1955]. Il est important de préciser, quand on utilise la valeur numérique du gain d'obstacle, s'il s'agit du gain que l'on aurait par rapport au champ calculé sur une terre sphérique homogène ne faisant intervenir que la diffraction et la réfraction atmosphérique normale (courbes de propagation des Atlas du C.C.I.R.), ou si l'on tient compte également de la diffusion et de la super-réfraction (courbes de l'Avis 370-2). Ce dernier cas se présente si l'on a à comparer les propagations sur deux trajets voisins ayant des distances et des hauteurs d'antenne analogues, mais dont un seulement donne lieu à diffraction sur une crête montagneuse, tandis que l'autre ne comporte pas d'obstacle. Des mesures effectuées dans de telles conditions ont confirmé la présence de tels gains [Dickson et autres, 1953; Norton et autres, 1955; Iwai, 1959; Fukami et autres, 1961; Kirby et autres, 1955].

On notera que la direction où le rayonnement reçu est le plus intense n'est pas forcément celle du grand cercle joignant l'émetteur et le récepteur, mais peut s'en écarter sensiblement, surtout lorsque le lieu de réception est très proche de la crête de diffraction (quelques kilomètres). Cette particularité donne à penser que, pour évaluer la qualité d'une transmission qui passe par-dessus la crête d'une montagne, il faut non seulement considérer le profil du terrain dans le plan du grand cercle, mais aussi étudier avec soin les propriétés de diffraction ou de diffusion de la crête en dehors de ce plan. Toutefois, si l'obstacle montagneux est peu éloigné du trajet du grand cercle, il n'introduit plus un gain notable [Kirby et autres, 1955].

On a effectué au Japon une étude sur la diffraction due à plusieurs crêtes, sur un grand nombre de trajets à ondes centimétriques [C.C.I.R., 1963-1966a]. On a décrit, à la suite de cette étude, une méthode empirique de prévision de l'affaiblissement de diffraction, et il est démontré que les résultats ainsi obtenus concordent assez bien avec ces données. (Néanmoins, dans un cas limite théorique où toutes les crêtes coïncident, la méthode ne donne pas la solution correcte.) Il est aussi démontré [C.C.I.R., 1963-1966a] que la variation de ces signaux avec le temps est proportionnelle à la fois à l'affaiblissement total de diffraction et au rapport de la longueur du trajet à la longueur d'onde.

On a constaté que, lorsque le champ observé est élevé, ce dernier est relativement stable et les évanouissements sont peu sensibles; par contre, dans les zones où le champ est normalement faible, les fluctuations dues aux variations de l'indice de réfraction sont très prononcées [Dickson et autres, 1953; Kirby et autres, 1955]. Etant donné que les champs élevés sont produits par l'addition de champs de même phase correspondant à des trajets différents, un changement appréciable du champ résultant ne peut avoir lieu que si les effets de la troposphère sur les composantes individuelles sont relativement prononcés. Réciproquement, les champs plus faibles, qui prennent naissance lorsque plusieurs composantes individuelles s'annulent partiellement, sont très sensibles aux variations de ces dernières. Cette conclusion est confirmée par la diminution de stabilité des champs forts lorsque la fréquence augmente depuis la gamme des ondes métriques (bande 8) jusqu'à celle des ondes centimétriques (bande 10). Il semble que, sur les liaisons utilisant la diffraction des ondes par les crêtes des montagnes, la gamme des ondes métriques est plus appropriée que les bandes de fréquences plus élevées.

Des travaux effectués au Royaume-Uni dans la bande I [C.C.I.R., 1963-1966b] ont montré que la présence d'une grande crête située à moins de 15 km de l'emplacement de réception sur un long trajet de propagation troposphérique cause par diffraction un affaiblissement pratiquement constant avec le temps, c'est-à-dire restant le même pour une propagation normale et pour une propagation anormale. Si la crête causant la diffraction est proche de l'une ou l'autre station terminale, le signal diffracté est d'un niveau plus élevé que celui des signaux dus aux autres mécanismes de propagation. Si la crête responsable de la diffraction est plus proche du centre du trajet et si l'atmosphère est dans un état de superréfraction, cette dernière peut conduire pendant de petites fractions du temps à une élévation considérable du niveau des signaux compensant et au-delà l'énergie qu'ils ont perdue par diffraction.

Des études faites au Japon sur 2 GHz [Okumura et Hara, 1965] montrent que, si un évanouissement considérable a été constaté pendant l'été, on n'a pas observé de variation saisonnière appréciable et l'on a observé une variation diurne très faible. En revanche, la distorsion due à la propagation par trajets multiples présente une variation considérable dans le temps, surtout en été, à cause de la sensibilité du phénomène aux évanouissements profonds de courte durée, et sa corrélation avec la distribution de l'amplitude des évanouissements est bonne. Le mois le plus défavorable quant à la distorsion due à la propagation par trajets multiples ne coïncide pas avec celui où l'affaiblissement de transmission est maximal.

Lorsque la propagation a lieu au-dessus de crêtes montagneuses de grande hauteur, une grande partie du trajet peut se trouver au-dessus des zones troposphériques dans lesquelles se produisent des variations brusques de l'indice de réfraction. D'autre part, il peut se présenter des différences marquées de conditions météorologiques sur les deux versants d'une chaîne de montagnes, de sorte qu'il se peut que, dans ce cas, les conditions qui donnent naissance aux évanouissements ne se présentent que sur une moitié du trajet à la fois.

Ces deux circonstances peuvent limiter les effets de la troposphère sur les composantes individuelles de l'onde diffractée et tendent à réduire les évanouissements qui se produisent aux points de réception où l'on constate une valeur de champ élevée [Kirby et autres, 1955]. Aussi longtemps que toutes ces recherches aboutissent à des résultats utiles, il est évidemment nécessaire de les poursuivre dans les pays qui présentent les caractéristiques topographiques requises pour les études relatives à des trajets radioélectriques comportant le passage de crêtes montagneuses.

3. Influence des petites et des moyennes irrégularités du terrain

La plupart des irrégularités du profil d'un terrain ne sont pas constituées par des obstacles isolés [NBS, 1967; Beckmann et Spizzichino, 1963; Thiessen, 1964], échappant à l'influence de collines et de vallées voisines. L'analyse descriptive des données de radiodiffusion consignées dans le Rapport 239-3 et dans l'Avis 370-2 montre, qu'en première approximation, on peut caractériser ces irrégularités par la différence Δh des hauteurs de terrain dépassées sur 10 % et 90 % d'un trajet de propagation dans l'intervalle compris entre 10 km et 50 km à partir de l'émetteur. Ce paramètre Δh est défini dans l'Avis 370-2.

L'expérience a montré que l'on peut améliorer les prévisions entre points fixes ou les prévisions de la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission dans la zone desservie par un émetteur de radiodiffusion, en utilisant des paramètres supplémentaires, notés ici et dans le Rapport 239-3, ce dernier donnant un résumé des comparaisons avec les données observées, tandis que le présent Rapport donne l'explication des phénomènes physiques qui justifient l'emploi des paramètres en question.

De certains travaux effectués en République Fédérale d'Allemagne et au Royaume-Uni [Thiessen, 1964; U.E.R. 1965], il ressort qu'on peut encore améliorer la précision des estimations en faisant intervenir, selon une méthode empirique, la pente moyenne du terrain au voisinage du point de réception. Ces travaux reposent sur le principe selon lequel on obtient un champ plus intense en ce point lorsque la direction d'arrivée de l'onde incidente forme un grand angle avec le terrain local. Ce raisonnement s'appuie, d'une part sur de simples considérations géométriques relatives aux rayons, d'autre part sur le fait que le trajet de propagation comporte une longueur de diffusion (due aux bâtiments, aux arbres, etc.) d'autant plus petite que cet angle est plus grand.

Dans une autre méthode empirique mise au point en République Populaire de Pologne [C.C.I.R., 1963-1966c], on considère le problème d'un point de vue différent. On y tient compte, sous forme d'un paramètre supplémentaire, de la longueur d'onde moyenne des ondulations du terrain, ce dernier étant alors représenté par un modèle sinusoïdal équivalent. Dans cette méthode on additionne les contributions des dernières ondulations du modèle sinusoïdal au facteur de terrain; cette sommation, effectuée empiriquement, se fait selon un procédé dérivé de la méthode de la Television Allocations Study Organization [LaGrone, 1960].

4. Corrélation entre trajets

Des mesures effectuées en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1963-1966d] et au Royaume-Uni [Wise, 1965] ont révélé que lorsque les émissions se font à partir d'emplacements voisins, on constate qu'il existe une bonne corrélation entre les champs mesurés dans des canaux à ondes décimétriques dont les séparations en fréquence peuvent atteindre 200 MHz. On obtient ainsi des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,9 en terrain plat et de 0,8 en terrain vallonné.

Des mesures analogues faites dans les bandes III et V ont montré que, au-dessus d'un terrain moyen, le coefficient de corrélation était encore de 0,7 même lorsque le rapport des fréquences était de 1 à 3. D'autre part, lorsque les émetteurs sont situés en des emplacements très éloignés les uns des autres, on trouve une valeur presque nulle pour le coefficient de corrélation entre les champs au point de réception, même lorsqu'il n'y a pratiquement pas d'écart de fréquence.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAUERMEISTER, E. et KNÖPFEL, W. [1952] UKW-Feldstärke-Voraussage in gebirgigem Gelände (Prévision de l'intensité de champ des ondes ultra-courtes en terrain irrégulier). Techn. Hausmitt. N.W.D.R. Jahrgang 4, 67-73.
- BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. [1963] *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Pergamon Press, Londres, New York, Paris.
- C.C.I.R. [1963-1966a] Doc. V/48, Japon.
- C.C.I.R. [1963-1966b] Doc. V/18, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1963-1966c] Doc. V/28, République Populaire de Pologne.
- C.C.I.R. [1963-1966d] Doc. V/42, République Fédérale d'Allemagne.
- DICKSON et autres [août 1953] *Proc. IRE*.
- FUKAMI, T. et autres [décembre 1961] Propagation measurements on long mountain diffraction paths, etc. *Electrical Communications Laboratory Journal, NTT*, Japon, Vol. 10, 2430.
- FURUTSU, K. [1957 et 1959] Wave propagation over an irregular terrain, I, II and III. *J. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 4, 16 (1957), Vol. 4, 18 (1957) et Vol. 6, 23 (1959).

- FURUTSU, K. [janvier-février 1963] On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth. *NBS Journ. of Research*, **67D** (Radio Prop.) **1**, 39-62.
- IWAI, F. et autres [septembre 1959] Radio transmission beyond the line-of-sight, etc. *Electrical Communications Laboratory Journal, NTT, Japon*, Vol. 8, 1183.
- KIRBY, R.S., DOUGHERTY, H. T. et MCQUATE, P. L. [1955] Obstacle gain measurements over Pikes Peak at 60 to 1046 Mc. *Proc. IRE*, **43**, **10**, 1467-1472.
- LAGRONE, A.H. [juin 1960] Forecasting television service fields. *Proc. IRE*, Vol. 48, 6.
- MILLINGTON, G., HEWITT, R. et IMMIRZI, F. S. [mars 1962] Double knife-edge diffraction in field strength predictions. I.E.E. Monograph 507 E.
- NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, Revised, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
- NORTON, K.A. et autres [octobre 1955] Use of angular distance in estimating transmission loss and fading range for propagation through a turbulent atmosphere over irregular terrain. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1488.
- OKUMURA, Y. et HARA, M. [1965] Long-term properties of UHF path loss and multipath distortion on over-the-horizon radio links using obstacle gain path. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT, Japon*, Vol. 13, **4**.
- THIESSEN, P. [1964] Über den Einfluss der Geländebeschaffenheit auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Bereich IV (Influence des irrégularités de terrain sur la propagation des ondes électromagnétiques dans la bande IV). *Rundfunktechnische Mitteilungen*, **8**, 22-38.
- U.E.R. [1965] Monographie C.
- WILKERSON, R. E. [1966] Multiple knife-edge diffraction. *NBS Journ. of Research*.
- WISE, F.H. [1965] The influence of propagation factors on UHF television. *Television Soc. Journal*, Vol. 10, **11**.

RAPPORT 336-1 *

RÉCEPTION SUR LA LUNE

(Question 9/2)

(1966 – 1974)

1. Introduction

Etant donné qu'il n'y a effectivement ni atmosphère ni ionosphère sur la Lune, les radiocommunications entre points situés sur sa surface ou au voisinage de celle-ci se transmettent dans des conditions qui sont essentiellement les mêmes que dans le cas de la propagation de l'onde de sol au-dessus de la Terre considérée comme une sphère non homogène ayant une surface irrégulière. Il est donc possible d'adapter les principes de la propagation de l'onde de sol, étudiés dans les textes de la Commission d'études 5, à une sphère ayant le rayon de la Lune en tenant compte, pour le sol, de constantes et de facteurs d'irrégularité appropriés à la surface de la Lune.

Il se pose toutefois le problème supplémentaire de la réception sur la Lune de communications en provenance d'émetteurs situés au voisinage de la Terre, c'est-à-dire d'émetteurs de Terre ou d'émetteurs fonctionnant en liaison avec la Terre à bord d'engins spatiaux ou de satellites sur orbite. Le problème consiste alors à établir des communications lorsque le point de réception se trouve, par rapport à l'émetteur, sur la face cachée de la Lune, de telle sorte que les signaux ne peuvent être reçus que par diffraction autour du bord de la Lune.

Il a par ailleurs été proposé de tirer avantage du fait qu'une région très importante de la Lune n'est jamais visible d'un point quelconque situé sur la Terre ou au voisinage de celle-ci, pour établir sur la Lune une zone de silence radioélectrique qui pourrait être utilisée pour y placer un observatoire de radioastronomie et de recherche spatiale qui ne serait exposé à aucun des parasites naturels ou industriels que l'on rencontre sur Terre.

Le présent Rapport a pour objet d'examiner ces aspects de la réception des radiocommunications sur la Lune en étudiant la diffraction à la surface et autour du bord de la Lune et en définissant la région dans laquelle la zone de silence radioélectrique doit se trouver.

* Le présent Rapport, qui a été adopté à l'unanimité, doit être porté à l'attention de la Commission d'études 2.

2. Diffraction dans la propagation lunaire

Le rayon de la Lune étant immense par rapport à la plus grande longueur d'onde que l'on pourrait envisager dans le contexte actuel, on a la chance de pouvoir résoudre ce problème en appliquant la théorie classique de la propagation des ondes radioélectriques autour d'une Terre sphérique, puisque la diffraction peut s'exprimer au moyen d'un rayon a , sans autre restriction que: $2\pi a/\lambda \gg 1$, où λ est la longueur d'onde exprimée dans la même unité que a . (Pour la Lune, la condition $2\pi a/\lambda = 10$ correspond approximativement à une fréquence de 300 Hz.)

Cette notion s'applique en principe à la diffraction autour de collines de forme sphérique ou cylindrique [Millington, 1960], pour lesquelles les diverses grandeurs qui entrent en jeu sont données graphiquement en fonction d'un certain paramètre qui dépend lui-même de la fréquence, du rayon de l'obstacle et de ses constantes électriques. Ces grandeurs sont liées à des facteurs tels que l'affaiblissement, en décibels par radian de distance angulaire, autour de la sphère dans la région de diffraction, ainsi que les paramètres par lesquels on exprime le gain en fonction de la hauteur.

En deçà de l'horizon, on peut appliquer, avec les limites qu'elles comportent, les méthodes de l'optique géométrique pour la réflexion sur une surface convexe, tandis que, aux courtes distances pour lesquelles il se peut que l'irrégularité de la surface constitue un facteur dominant, il faut appliquer les méthodes décrites dans le Rapport 236-3 concernant la propagation au-dessus d'un terrain irrégulier.

Pour des hauteurs ou des distances sur la Lune au moins comparables au rayon de cette dernière, mais dans le cas où il n'y a pas de visibilité directe entre les extrémités du trajet de propagation, on peut employer des méthodes approchées permettant de traiter le problème comme une combinaison de l'affaiblissement en espace libre (loi de l'inverse de la distance) le long des tangentes menées à la sphère par les extrémités du trajet et de l'affaiblissement de diffraction sur la distance angulaire de la portion de sphère qui fait obstacle à la visibilité directe. Ceci s'applique notamment au cas de la réception, sur la face cachée de la Lune, de radiocommunications en provenance d'émetteurs situés au voisinage de la Terre.

Il apparaît donc que tous les renseignements essentiels nécessaires pour résoudre ce problème existent déjà sous une forme facilement adaptable aux paramètres considérés comme applicables à la surface incurvée de la Lune. En fait, des études ont déjà été faites selon ces principes, pour certaines constantes électriques supposées de la Lune [Vogler, 1965] (voir également les Rapports 568 et 570).

3. Région où doit se trouver la zone de silence radioélectrique

3.1 Considérations générales

Etant donné que la période de rotation de la Lune sur son axe est identique à celle de sa révolution autour de la Terre, elle présente toujours le même côté ou la même face à cette dernière. Toutefois, en raison des librations de la Lune et du fait que son orbite est elliptique et inclinée, 59 % environ de sa surface est visible, à un moment ou à un autre, de la surface de la Terre. Il y a néanmoins une région très importante de la face cachée de la Lune qui reste très à l'abri des ondes radioélectriques provenant d'émetteurs situés sur la Terre ou au voisinage de celle-ci.

Etant donné que la zone de silence radioélectrique recherchée ne peut pas occuper toute cette région soumise à l'effet d'écran, nous appellerons cette région « la calotte abritée » puisque, d'après le critère à adopter pour la définir, c'est la calotte d'une sphère ayant un rayon égal à celui de la Lune.

3.2 Critères servant à déterminer la surface de la calotte abritée

Il est évidemment nécessaire de limiter la distance comprise entre la Terre et un émetteur situé au voisinage de la Terre et nous considérerons que tous les émetteurs de ce type se trouvent dans une sphère ayant un rayon de 100 000 km centré sur le centre de gravité de la Terre. Nous spécifierons alors qu'aucune partie de la calotte abritée ne peut jamais recevoir de transmissions en visibilité directe d'un émetteur situé à Terre ou au voisinage de celle-ci. Ces deux critères conduisent à une définition assez simple de la calotte abritée en fonction de l'angle conique sous-tendu au centre de la Lune,

3.3 Surface de la calotte abritée

La surface approximative de la calotte abritée peut être déterminée en supposant que la Lune est une sphère unie ayant un rayon de 1738 km et tournant autour de la Terre sur une orbite elliptique [Allen, 1962]. Il convient d'ajouter les effets des librations optiques normales, qui représentent $7,6^\circ$ en longitude et $6,7^\circ$ en latitude, à la libration parallaxique vue d'un engin spatial situé à 100 000 km par rapport au centre de la Terre. Il existe d'autres effets peu importants de libration que nous pouvons considérer ici comme négligeables. (Les librations de la Lune sont bien décrites dans la référence [Koziel, 1962].)

On peut alors démontrer que le demi-angle du cône définissant la surface de la calotte abritée est de $66,8^\circ$, que son axe longe la ligne qui joint les centres de la Terre et de la Lune, et que la surface de la calotte est de $1,15 \times 10^7 \text{ km}^2$, ce qui représente 30 % de la surface totale de la Lune.

3.4 Efficacité du phénomène d'écran

Le sol lunaire a une constante diélectrique d'environ 2,6 et une très faible conductibilité [Gold et autres, 1970; England et autres, 1968]. Les ondes radioélectriques sont affaiblies très rapidement lorsqu'elles parviennent sous incidence verticale sur la Lune; les valeurs typiques de la longueur d'absorption (la profondeur à laquelle le champ est réduit selon un facteur de 2,71828) sont de 10 à 20 longueurs d'onde pour une gamme de longueurs d'onde allant de quelques centimètres à un kilomètre.

D'après ce qui précède, les effets de diffraction aux bords de la calotte abritée permettront aux ondes radioélectriques de se propager sur une certaine distance à l'intérieur de la calotte abritée mais, aux longueurs d'onde considérées, il est peu probable qu'ils provoquent de sérieuses perturbations au-delà de 100 km environ à l'intérieur des limites de la calotte abritée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN, C.W. [1962] *Astrophysical quantities*. Université de Londres.
- ENGLAND, A.W., SIMMONS, G. et STRANGWAY, D. [1968] Electrical conductivity of the moon. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, **10**, 3219.
- GOLD, T., CAMPBELL, M.J. et O'LEARY, B. T. [1970] *Science*, Vol. 167, 707-709.
- KOZIEL, K. [1962] The libration of the Moon. *Physics and astronomy of the Moon* (Z. Kopal, ed.), 27-58, Academic Press, Londres.
- MILLINGTON, G. [1960] A note on diffraction round a sphere or cylinder. *Marconi Review*, Vol. 23, **139**, 170.
- VOGLER, L.E. [1965] A study of lunar-surface radiocommunications. NBS Monograph No. 85.

RAPPORT 428-1 *

CALCUL A L'ORDINATEUR DE COURBES DE PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL

(1970 – 1974)

Le Rapport 235-2 traite des courbes de propagation de l'onde de sol, plus particulièrement pour ce qui est de l'influence de la troposphère sur les fréquences inférieures à 10 MHz. On y signale qu'il y a une discontinuité à ce point de vue entre les courbes des Atlas du C.C.I.R. pour les fréquences supérieures à 30 MHz et celles de l'Avis 368-2 dans lesquelles il n'est pas tenu compte des effets de la troposphère ni de ceux du gain en fonction de la hauteur.

Pour l'établissement d'un programme quelconque et le tracé des nouvelles courbes, il conviendra de tenir compte si possible des effets de la troposphère conformément à ce qui est exposé dans le Rapport 235-2, car dans une gamme étendue de fréquences au-dessous de 10 MHz, le fait de négliger ces effets peut avoir des conséquences plus graves que les erreurs dues aux incertitudes sur la connaissance de ϵ et de σ le long d'un trajet de propagation donné.

* Adopté à l'unanimité.

Etant donné que les effets du gain en fonction de la hauteur peuvent présenter de l'importance sur des fréquences nettement inférieures à 10 MHz, on pourrait profiter de l'occasion pour tracer en temps utile les courbes de ce gain. Il faudrait toutefois indiquer avec soin quelles sont les limites de leur emploi, du fait qu'il n'est pas proposé d'adopter la présentation des données du gain en fonction de la hauteur, employées pour les fréquences supérieures à 30 MHz; une telle présentation n'est pas souhaitable, car elle aboutirait à un Atlas extrêmement volumineux.

Lors de la description de toute courbe révisée, il convient d'attirer l'attention sur l'importance relative que revêtent la constante diélectrique et la conductivité sur une fréquence donnée, fait dont il devra être tenu compte lors du choix des valeurs pour lesquelles les courbes sont données. On se référera à cet égard aux renseignements pertinents du Rapport 229-2.

On n'a pas parlé dans ce qui précède des effets de l'ionosphère, mais le programme de travail envisagé ici serait d'un intérêt particulier dans les bandes des ondes hectométriques et kilométriques sur lesquelles il est possible, moyennant des méthodes appropriées, d'isoler l'onde de sol. Ce programme de travail, en outre, répondrait en partie aux besoins urgents du service de radiodiffusion sur ondes hectométriques et kilométriques.

RAPPORT 568 *

DIFFRACTION SUR LA TERRE SPHÉRIQUE

(1974)

Pour la détermination de l'affaiblissement de diffraction A par rapport à l'espace libre au-delà de l'horizon, au-dessus d'une terre sphérique lisse et pour la polarisation horizontale [NBS, 1967], on peut utiliser une formule approchée:

$$A = G(\chi_0) - F(\chi_1) - F(\chi_2) - 20,5 \text{ dB} \quad (1)$$

dans laquelle

$$\chi_0 = d_0 \cdot Bo \quad (2)$$

$$\chi_1 = d_1 \cdot Bo \quad (3)$$

$$\chi_2 = d_2 \cdot Bo \quad (4)$$

$$Bo = 670 (f/a_e^2)^{1/2} \quad (5)$$

d_0 est la distance totale en kilomètres, d_1 et d_2 sont les distances en kilomètres entre chaque antenne et son horizon radioélectrique:

$$d_1 = \sqrt{2a_e h_1} \quad (6)$$

$$d_2 = \sqrt{2a_e h_2} \quad (7)$$

dans lesquelles h_1 et h_2 sont les hauteurs des antennes en kilomètres, a_e est le rayon terrestre équivalent en kilomètres défini dans le Rapport 563 et f est la fréquence en MHz.

Les fonctions $G(\chi_0)$, $F(\chi_1)$, $F(\chi_2)$ sont tracées sur la Fig. 1. Le facteur K sur cette figure dépend de la fréquence et des caractéristiques électriques du sol. La valeur $K = 0$ peut être utilisée pour l'eau de mer, $K = 0,005$ pour un sol moyen et $K = 0,01$ pour un sol sec.

L'erreur sur A sera inférieure à 1 dB si on a:

$$\chi_0 - \chi_1 \cdot \Delta(\chi_1) - \chi_2 \cdot \Delta(\chi_2) > 320 \quad (8)$$

Les fonctions auxiliaires $\Delta(\chi_1)$, $\Delta(\chi_2)$ sont tracées sur la Fig. 1. L'inégalité (8) implique la prédominance du premier terme de la série des résidus.

Il existe une solution analogue pour la polarisation verticale [NBS, 1967].

* Adopté à l'unanimité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, Révision de l'édition 1966, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.

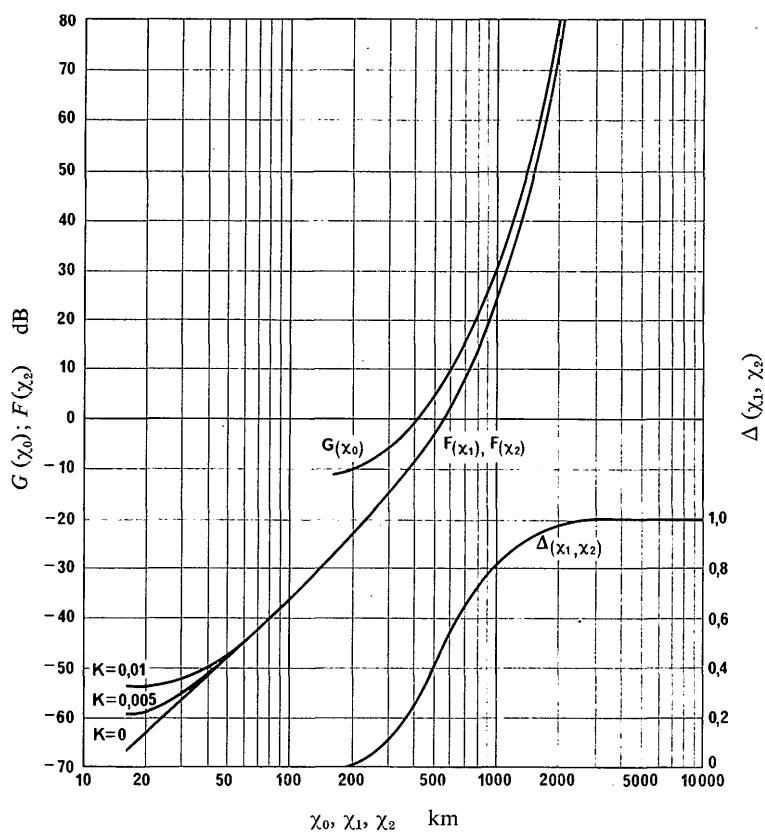


FIGURE 1

Note. — Pour les grandes valeurs de χ :

$$F(\chi) \approx G(\chi) - 1,356,$$

expression dans laquelle: $G(\chi) \approx 0,0575104 \chi - 10 \log \chi + 2,066$

RAPPORT 570 *

DIFFRACTION PAR LES OBSTACLES

Estimation de l'affaiblissement

(1974)

1. Introduction

De nombreux trajets de propagation comportent un ou plusieurs obstacles séparés et il est intéressant d'estimer les affaiblissements introduits par de tels obstacles. Pour pouvoir effectuer les calculs, on est conduit à idéaliser la forme de ces obstacles soit par une arête d'épaisseur négligeable, soit par une arête épaisse lisse dont le rayon de courbure au sommet est bien défini. Il est bien certain que les obstacles réels ont des formes plus complexes, aussi les indications données dans ce Rapport doivent être considérées seulement comme une approximation.

Bien que la diffraction soit produite seulement par la surface du sol, on doit tenir compte de la réfraction moyenne de l'atmosphère sur le trajet pour évaluer les paramètres géométriques situés dans le plan vertical de la liaison (angle de diffraction, rayon de courbure, hauteur de l'obstacle). Pour cela le profil de la liaison doit être tracé avec le rayon terrestre équivalent convenable (Rapport 563). En l'absence d'autres indications, on peut prendre un rayon terrestre équivalent de 8500 km.

Enfin les indications données dans ce Rapport s'appliquent lorsque la longueur d'onde est assez petite par rapport aux dimensions des obstacles, c'est-à-dire principalement aux ondes métriques et plus courtes ($f > 30$ MHz).

2. Obstacle isolé en « lame de couteau »

Dans ce cas extrêmement idéalisé (Fig. 1) tous les paramètres géométriques se regroupent dans un paramètre sans dimension désigné habituellement par v et qui peut prendre plusieurs formes différentes équivalentes, suivant les paramètres géométriques choisis:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.1)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (2.2)$$

$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}} \quad (v \text{ est du signe de } h \text{ et de } \theta) \quad (2.3)$$

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \alpha_2} \quad (v \text{ est du signe de } \alpha_1 \text{ et } \alpha_2) \quad (2.4)$$

- h est la hauteur du sommet de l'arête au-dessus de la ligne droite joignant les deux extrémités. Si le sommet est au-dessous de cette ligne, h est négatif,
- d_1 et d_2 sont les distances des deux extrémités à l'arête,
- d est la longueur de la liaison: $d = d_1 + d_2$,
- θ est l'angle de diffraction en radians; son signe est le même que celui de h . L'angle θ est supposé inférieur à environ 0,2 radian soit approximativement 12° .
- α_1 et α_2 sont les angles sous lesquels on voit, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée. α_1 et α_2 sont du signe de h dans les relations ci-dessus, h , d_1 , d_2 , d et λ sont exprimés avec la même unité.

La Fig. 2 donne, en fonction de v , l'affaiblissement en décibels, apporté par la présence de l'arête. Pour un affaiblissement supérieur à environ 15 dB, on peut remplacer la valeur lue sur la courbe par la valeur approchée $13 + 20 \log v$.

* Adopté à l'unanimité.

3. Diffraction par un obstacle unique de forme arrondie

Un trajet de propagation ne présentant qu'un seul accident de terrain isolé — horizon pour les deux extrémités — peut souvent être considéré comme ayant entre celles-ci une arête en lame de couteau arrondie unique qui provoque la diffraction. Pour $\theta \geq 0$, l'affaiblissement de diffraction A (en dB à ajouter à l'affaiblissement d'espace libre), peut s'exprimer par :

$$A = F(v) + G(\rho) + E(\chi) \quad (3.1)$$

a) L'affaiblissement $F(v)$ de Fresnel-Kirchhoff est représenté sur la Fig. 2 en fonction du paramètre sans dimension :

$$v = 2 \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) \left[\frac{2(d_a + R \cdot \theta/2)(d_b + R \cdot \theta/2)}{\lambda \cdot d} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

λ étant la longueur d'onde radioélectrique, d_a et d_b les distances respectives entre les points terminaux et leurs horizons sur l'élévation de terrain. R est le rayon de courbure équivalent de l'accident de terrain situé entre les horizons et déterminé par le produit du rayon géométrique et du facteur multiplicatif k . Les distances et les longueurs sont exprimées dans les mêmes unités. Pour $R = 0$, l'expression (3.2) se réduit à l'expression (2.2) du § 2.

b) L'affaiblissement pour l'incidence rasante ($\theta = 0$) est donné par [Dougherty et Wilkerson, 1967] :

$$G(\rho) = 7,192 \rho - 2,018 \rho^2 + 3,63 \rho^3 - 0,754 \rho^4 \quad (3.3)$$

expression dans laquelle ρ est donné par :

$$\rho^2 = \frac{d_a + d_b}{d_a d_b} \left/ \left[\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3} \frac{1}{R} \right] \right. \quad (3.4)$$

c) $E(\chi)$, affaiblissement pour la propagation le long de la surface comprise entre les deux horizons a pour expression :

$$E(\chi) = \begin{cases} 12 \chi & \text{pour } \chi < 4 \\ 17,1 \chi - 6,2 - 20 \log \chi & \text{pour } \chi \geq 4 \end{cases} \quad (3.5)$$

avec

$$\chi = \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3} \theta. \quad (3.6)$$

Pour $R = 0$, ρ et χ s'annulent, et l'expression (3.1) se réduit à son premier terme (voir le § 2). Pour $\theta = 0$, on a $\chi = 0$ et (3.1) représente alors l'affaiblissement pour l'incidence rasante sur la lame de couteau ou l'obstacle de forme arrondie.

La solution (3.1) résulte du premier terme d'un développement asymptotique selon les puissances inverses de s . Cela suppose que les antennes d'émission et de réception sont toutes deux éloignées de leur horizon respectif sur l'accident de terrain qui provoque la diffraction [Dougherty, 1969].

En d'autres termes :

$$s = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \left[d_a d_b \right]^{1/2} \geq 10 \quad (3.7)$$

et

$$\left[\left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3} \frac{1}{R} \right]^2 d_a d_b \geq 0,1 \quad (3.8)$$

Il est courant que ces conditions soient satisfaites pour les gammes de fréquences considérées dans le présent Rapport, pour une polarisation quelconque et pour un sol dont les constantes ont des valeurs que l'on rencontre normalement dans le cas de terrain irrégulier. La solution s'applique aussi à une terre sphérique, sous réserve que les deux conditions (3.7) et (3.8) soient satisfaites, sauf dans le cas spécial de la polarisation verticale au-dessus de la mer lorsque la fréquence est supérieure à 1 GHz.

4. Diffraction au-dessus d'obstacles multiples et d'un terrain irrégulier

4.1 Lames de couteau multiples

La théorie de la diffraction au-dessus de deux lames de couteau a fait l'objet d'un traitement complet [Millington et autres, 1962]; il existe une méthode rigoureuse pour faire la prévision du champ dans ce cas. Pour trouver la solution théorique du problème de la diffraction sur plusieurs lames de couteau successives (trois ou plus), il faut calculer une intégrale multiple du type de Fresnel, dont la dimension est égale au nombre des lames; ce problème est compliqué, mais il peut être résolu sur ordinateur. Il existe toutefois, pour les besoins purement techniques, une méthode approchée [Deygout, 1966] fondée sur une extension de la théorie de la diffraction sur une seule lame de couteau.

4.2 Diffraction sur plusieurs obstacles de forme arrondie

Il n'existe pas de méthode rigoureuse permettant de prévoir le champ dans le cas de la diffraction sur plusieurs obstacles arrondis. On dispose d'une méthode approchée [Assis, 1971] conduisant à une solution simplifiée, fondée sur l'hypothèse suivante: chaque obstacle peut être représenté par un cylindre dont le rayon est égal au rayon de courbure au sommet de l'obstacle.

4.3 Diffraction par une arête située sur une terre sphérique homogène

On a proposé une méthode semi-empirique [Furutsu, 1962; Furutsu et Wilkerson, 1971] pour estimer le gain dû à une crête ou à une falaise se trouvant sur une terre sphérique homogène. Cette méthode utilise des graphiques des « gains terminaux » des obstacles, définis par les valeurs asymptotiques des gains d'obstacle (théoriques) pour une distance de propagation infinie d'un côté de l'obstacle, finie de l'autre. Selon cette méthode, on peut estimer les gains d'obstacle en additionnant deux gains terminaux vus de chaque côté de l'obstacle et en soustrayant la valeur asymptotique pour des distances de propagation infinies de chaque côté. Les erreurs sur les gains estimés comme il vient d'être dit sont tout au plus de quelques dB pour des valeurs importantes des hauteurs des obstacles, et tendent vers zéro à mesure que la distance de propagation de chaque côté de l'obstacle augmente.

On a d'autre part fait un atlas des gains terminaux pour une crête (hauteur au plus égale à 1000 m) et pour une falaise (hauteur au plus égale à 500 m) situées sur une terre sphérique homogène, pour six hauteurs d'antenne (5, 10, 15, 20, 25 et 30 m) et pour sept fréquences (30, 60, 100, 150, 200, 300 et 500 MHz).

4.4 Terrain irrégulier

On a mis au point des méthodes théoriques pour traiter la diffraction de certains modèles de caractéristiques des terrains [Furutsu, 1957 et 1959]. Certains trajets peuvent être traités comme une succession de crêtes assimilables à des lames de couteau ou à des cylindres, selon la courbure plus ou moins grande des crêtes. On a aussi mis au point une méthode théorique fondamentale pour traiter le problème de la propagation des ondes au-dessus d'un terrain irrégulier, en appliquant des équations intégrales [Hufford, 1952].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSIS, M.S. [mars 1971] A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-19, 292-295.
- DEYGOUT, J. [juillet 1966] Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-14, 480-489.
- DOUGHERTY, H.T. [1969] An approximate closed-form method of solution for the diffraction of radio-waves by irregular surfaces. *Dissertation Abstracts*, Engineering B. Ord. No. 69-4358.
- DOUGHERTY, H.T. et WILKERSON, R.E. [1967] Determination of antenna height for protection against microwave diffraction fading. *Radio Science*, 2 (New Series).
- FURUTSU, K. [1957 et 1959] Wave propagation over an irregular terrain, I, II and III. *Journal of Radio Research Laboratories*, Japon, Vol. 4, 16 (1957), Vol. 4, 18 (1957) et Vol. 6, 23 (1959).
- FURUTSU, K. [janvier 1962] Effect of ridge, cliff and bluff at a coastline on ground-waves. *Journal of Radio Research Laboratories*, Japon, Vol. 9, 41.

FURUTSU, K. et WILKERSON, R.E. [1971] Optical approximation for the residue series of terminal gain in radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *Proc. I.E.E.*, Vol. 118, 9, 1197-1202.

HUFFORD, G.A. [1952] An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular terrain. *Quarterly of the Journal of Applied Mathematics*, 9, 4, 391-404.

MILLINGTON, G., HEWITT, R. et IMMIRZI, F.S. [mars 1962] Double knife-edge diffraction in field strength predictions. I.E.E. Monograph 507 E.

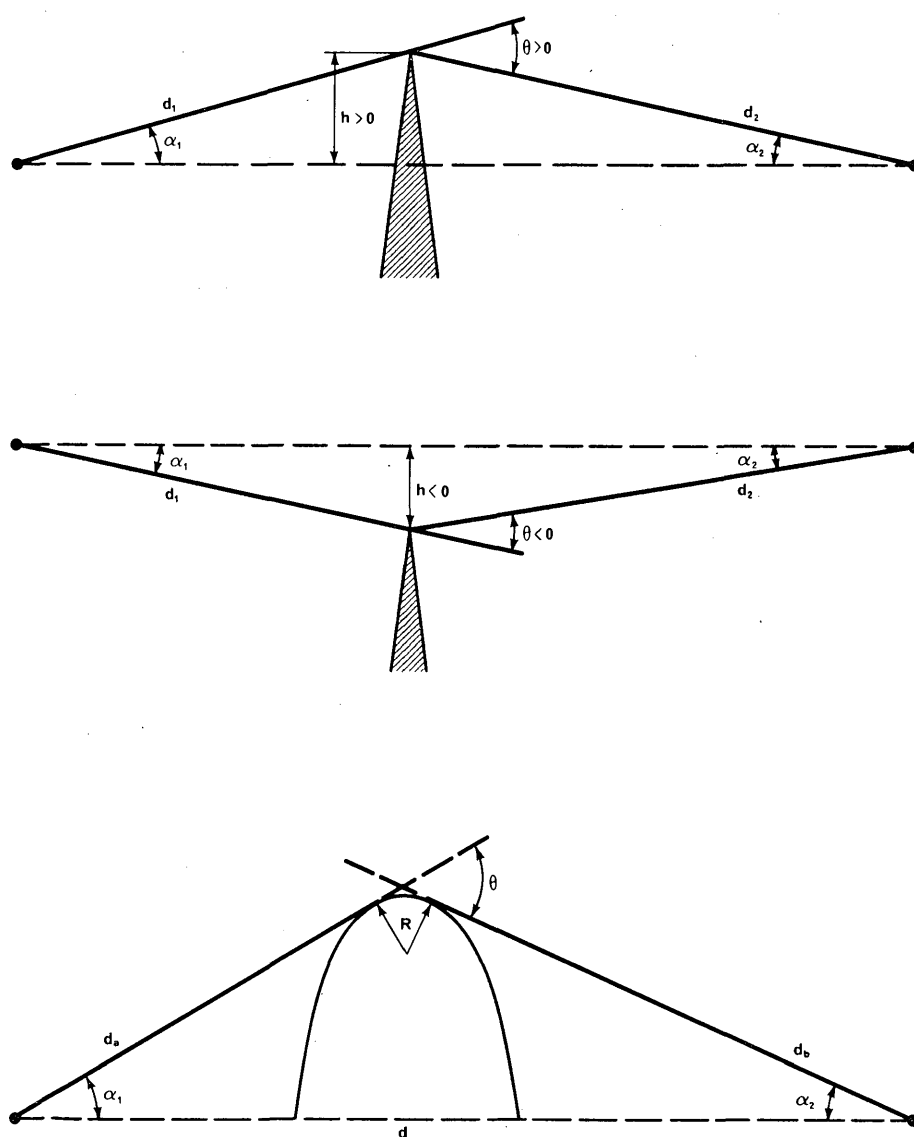


FIGURE 1

Eléments géométriques

(Pour les définitions de θ , α_1 , α_2 , h , d , d_1 , d_2 , d_a , d_b et R , voir les § 2 et 3)

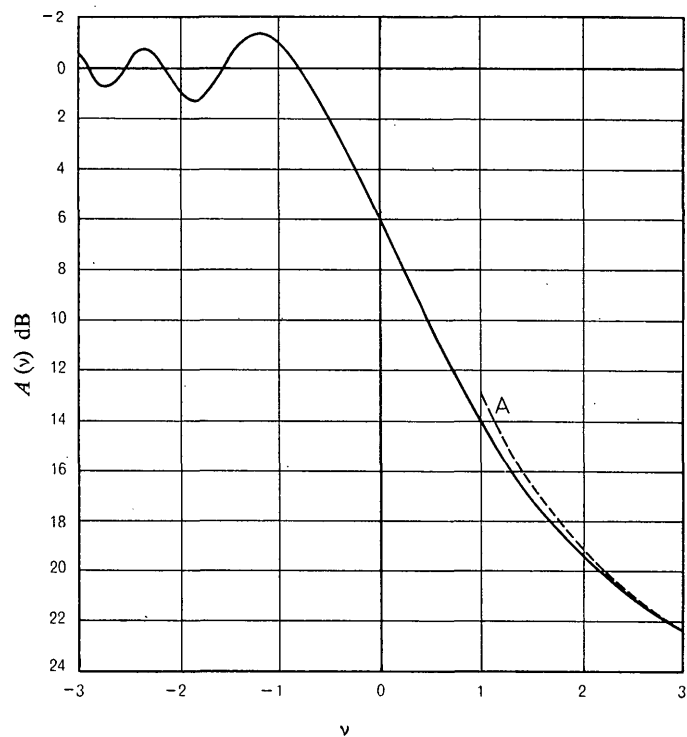


FIGURE 2

Diffraction sur une lame de couteau — Affaiblissement de transmission par rapport à l'espace libre

Courbe A: Asymptote: $A(v) = 13 + 20 \log v$

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5C: EFFETS DUS A L'ATMOSPHERE (RADIOMETEOROLOGIE)

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 310-3

DÉFINITIONS DE TERMES SE RAPPORTANT A LA PROPAGATION
DANS LA TROPOSPHERE

(1951 – 1959 – 1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

qu'il est notoire que la propagation des ondes de fréquence supérieure à 30 MHz est grandement influencée par les conditions météorologiques dans la troposphère,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que la liste des définitions ci-dessous soit adoptée en vue de son incorporation dans le Vocabulaire.

VOCABULAIRE DES TERMES RELATIFS A LA PROPAGATION TROPOSPHERIQUE

Termes	Définitions
1. <i>Troposphère</i>	Région inférieure de l'atmosphère terrestre, immédiatement au-dessus de la surface de la Terre et dans laquelle la température décroît lorsque l'altitude augmente, sauf dans certaines couches locales d'inversion de température. Cette partie de l'atmosphère s'étend jusqu'à une altitude de l'ordre de 9 km aux pôles et de 17 km à l'équateur.
2. <i>Tropopause</i>	Limite supérieure de la troposphère, au-dessus de laquelle la température croît légèrement avec l'altitude ou demeure constante. (Une définition plus détaillée, donnée par l'O.M.M., est signalée dans le Doc. V/9 du C.C.I.R., 1966-1969.)
3. <i>Inversion de température</i>	Augmentation de température avec la hauteur.
4. <i>Rapport de mélange</i>	Rapport de la masse de la vapeur d'eau à la masse de l'air sec dans un volume donné d'air (exprimé fréquemment en g/kg).
5. <i>Humidité relative par rapport à l'eau (ou à la glace)</i>	Rapport exprimé en pourcentage, de la tension de vapeur d'eau présente dans l'air humide à la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau (ou à la glace) à la même température et la même pression.
6. <i>Indice de réfraction (n)</i>	Rapport entre la vitesse des ondes dans le vide et dans le milieu considéré.
7. <i>Coïndice (N)</i>	Excès de <i>n</i> par rapport à l'unité, exprimé en millionièmes.
8. <i>Unité N</i>	Unité dans laquelle est exprimé le coïndice.
9. <i>Indice de réfraction modifié</i>	Somme de l'indice de réfraction de l'air à une certaine hauteur au-dessus du niveau de la mer et du rapport de cette hauteur au rayon de la Terre.
10. <i>Module de réfraction</i>	Excès sur l'unité, exprimé en millionièmes de l'indice de réfraction modifié.
11. <i>Unité M</i>	Unité dans laquelle est exprimé le module de réfraction.

Termes	Définitions
12. <i>Gradient normal du coïndice</i>	Valeur conventionnelle du gradient vertical du coïndice. Cette valeur utilisée comme base de comparaison pour les études de phase et de réfraction est de -40 N/km. Elle correspond approximativement à la valeur médiane du gradient sur le premier kilomètre d'altitude dans les régions tempérées.
13. <i>Atmosphère radio-électrique normale</i>	Atmosphère ayant un gradient normal du coïndice de réfraction.
14. <i>Atmosphère fondamentale de référence</i>	Atmosphère dont le coïndice (N) est une fonction exponentielle décroissante de la hauteur (Avis 369-1).
15. <i>Réfraction normale</i>	Réfraction qui se produirait dans l'atmosphère radioélectrique normale.
16. <i>Infraréfraction</i>	Réfraction pour laquelle le gradient du coïndice de réfraction est supérieur à la normale.
17. <i>Superréfraction</i>	Réfraction pour laquelle le gradient du coïndice de réfraction est inférieur à la normale.
18. <i>Horizon radio-électrique</i>	Lieu des points en lesquels les rayons provenant d'une antenne deviennent tangents à la surface de la Terre, compte tenu de la courbure due à la réfraction.
19. <i>Horizon radio-électrique normal</i>	Horizon radioélectrique dans le cas d'une réfraction normale.
20. <i>Rayon terrestre équivalent</i>	Rayon d'une Terre fictive et sans atmosphère, telle que les trajets radio-électriques au-dessus de cette Terre soient rectilignes, les altitudes et les distances le long du sol étant les mêmes que sur la Terre réelle supposée entourée d'une atmosphère dont le gradient vertical du coïndice est constant. (Pour l'atmosphère radioélectrique normale, le rayon terrestre équivalent est égal aux $4/3$ du rayon réel de la Terre.) <i>Note.</i> — La notion du rayon terrestre équivalent implique que le trajet radioélectrique ne fait en aucun point un angle trop grand avec le plan horizontal correspondant.
21. <i>Conduit troposphérique radioélectrique</i>	Couche quasi horizontale de la troposphère, entre les limites de laquelle l'énergie d'une fréquence donnée suffisamment élevée reste pratiquement confinée et se propage avec un affaiblissement anormalement bas.
22. <i>Conduit au sol (Conduit de surface)</i>	Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au sol.
23. <i>Conduit élevé</i>	Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au-dessus du sol.
24. <i>Epaisseur du conduit</i>	Différence d'altitude entre les surfaces limites, inférieure et supérieure, d'un conduit troposphérique radioélectrique.
25. <i>Hauteur du conduit</i>	Hauteur au-dessus du sol de la surface inférieure d'un conduit élevé.
26. <i>Propagation guidée (mode guidé)</i>	Propagation à l'intérieur d'un conduit troposphérique. A des fréquences suffisamment élevées plusieurs modes de propagation peuvent exister (comme dans un guide d'onde).
27. <i>Propagation transhorizon</i>	Propagation sur des trajets dépassant l'horizon radioélectrique normal. Il peut englober divers mécanismes tels que la diffraction, la diffusion avant, la réflexion spéculaire et diffuse et la propagation guidée.
28. <i>Propagation par diffusion troposphérique</i>	Propagation mettant en jeu la diffusion par de nombreuses inhomogénéités ou discontinuités de l'indice de réfraction de l'atmosphère.
29. <i>Propagation par diffusion par les précipitations</i>	Propagation due à la diffusion par les particules des précipitations.
30. <i>Propagation par trajets multiples</i>	Propagation par un certain nombre de trajets de transmission.

AVIS 369-1

DÉFINITION D'UNE ATMOSPHÈRE FONDAMENTALE DE RÉFÉRENCE

(1959 – 1963 – 1966)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que la variation de l'indice de réfraction n de l'air en fonction de la hauteur h , aux fréquences radioélectriques, s'exprime de manière satisfaisante par la loi

$$n(h) = 1 + a.e^{-bh}$$

a et b étant des constantes qui peuvent être déterminées pour différents climats par des méthodes statistiques,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que l'atmosphère fondamentale de référence est définie par la relation:

$$n(h) = 1 + 289.10^{-6}.e^{-0,136h}$$

h désignant la hauteur en kilomètres au-dessus du niveau de la mer.

Note. — Le gradient de l'indice de réfraction fourni par cette atmosphère à la surface du sol est très sensiblement égal à celui d'une atmosphère dont l'effet peut être représenté par un rayon équivalent égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre.

AVIS 453

FORMULE DONNANT L'INDICE DE RÉFRACTION RADIOÉLECTRIQUE

(Question 2-2/5)

(1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) la nécessité d'utiliser une formule unique pour le calcul de l'indice de réfraction radioélectrique de l'atmosphère;
- b) l'intérêt que cette formule soit exprimée dans un système d'unité cohérent,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que l'indice de réfraction radioélectrique de l'atmosphère n soit donné par la formule suivante:

$$n = 1 + N.10^{-6}$$

dans laquelle:

N est le coïndice exprimé par:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \text{ avec}$$

p : pression atmosphérique (mb),

e : tension de vapeur d'eau (mb),

T : température absolue (K).

5C: *Rapports*

RAPPORT 233-3 *

INFLUENCE DES RÉGIONS NON IONISÉES DE L'ATMOSPHÈRE
SUR LA PROPAGATION DES ONDES

Propagation sol-sol

(Question 2-2/5)

(1959 – 1963 – 1966 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Bien qu'il y ait toujours une influence de l'atmosphère sur la propagation, cette influence n'est pas la même suivant la nature du trajet de propagation et les fréquences utilisées.

Dans ce Rapport, on se limitera aux liaisons sol-sol quel que soit l'usage de ces liaisons. Donc en particulier des services aussi différents que la radiodiffusion ou les faisceaux hertziens trouveront ici les influences de l'atmosphère sur la propagation pour toutes les fréquences qui sont prises en considération dans les travaux de la Commission d'études 5.

On étudiera également un phénomène commun à tous les types de liaisons, la réfraction, plutôt que les phénomènes qui se rattachent plus particulièrement aux liaisons transhorizon ou aux liaisons en visibilité directe.

Dans la mesure du possible, on a renvoyé à des rapports plus spécialisés lorsque le développement d'une question intéresse un service particulier parmi ceux cités ci-dessus.

L'étude de certains paramètres radiométéorologiques qui sera exposée ci-dessous peut donner lieu à la recherche de modèles. Il ne faut pas oublier cependant que chaque modèle n'est acceptable que pour une application spécifiée et il y aura toujours une incertitude à utiliser un modèle dans une application pour laquelle il n'a pas été prévu.

A titre d'exemple,

- la mesure d'une distance fait intervenir directement l'indice de réfraction de l'air sous la forme d'une intégrale

$$l = \int_S n ds$$

dans laquelle l est la longueur du chemin optique de la trajectoire S et n l'indice de réfraction au point d'abscisse curviligne s sur cette trajectoire;

- la mesure d'un angle fait intervenir le gradient de l'indice puisque la courbure d'une trajectoire à un point est directement proportionnelle au gradient de l'indice en ce point;
- l'affaiblissement de transmission dans la propagation transhorizon fait intervenir certains paramètres radiométéorologiques, tels que le gradient de l'indice de réfraction et la stabilité de l'atmosphère.

2. Réfraction

2.1 Généralités

Pour les trajets radioélectriques voisins de l'horizontale, il est bien connu que le rayon d'une courbure de ce trajet est pratiquement égal au gradient vertical de l'indice de réfraction.

* Adopté à l'unanimité.

En utilisant des valeurs moyennes, on a ainsi introduit une atmosphère radioélectrique normale à laquelle correspond un rayon terrestre équivalent égal au rayon terrestre réel multiplié par $4/3$. Dans le cas général, ce facteur multiplicatif, que l'on représente habituellement par k , peut se déterminer pour toute région à partir d'observations météorologiques ou de mesures de propagation. En général, la valeur de k déduite de mesures de propagation représente une moyenne dans l'espace, que l'on ne pourrait autrement obtenir que par de nombreux sondages météorologiques simultanés effectués le long du trajet de propagation. La distribution des valeurs ainsi déterminées présente moins de variabilité que celle déduite de mesures météorologiques prises en des points isolés. Cette variabilité diminue lorsque la distance augmente.

On a introduit la notion de gradient équivalent qui est le gradient fictif constant qui, lorsqu'il remplace les gradients réels sur un trajet donné, produit les mêmes effets de réfraction [Misme, 1960].

De plus, les variations des valeurs sur la Terre de l'indice de réfraction apparaissent bien liées à la réfraction des ondes radioélectriques aux Etats-Unis d'Amérique pour des angles de site de 1° au minimum; cependant, pour des angles inférieurs à $0,5^\circ$, il faut tenir compte du gradient vertical [Gray, 1959; Bean et Cahoon, 1957]. De ce fait, en plus de la valeur moyenne de ΔN , il peut être utile de connaître la loi de distribution du gradient au voisinage du sol et sa dépendance à l'égard des conditions climatiques.

Il paraît impossible de dresser des cartes mondiales pour tous les paramètres énumérés ci-dessus. On trouvera cependant dans le Rapport 563 des cartes de ΔN et de N_0 pour certains mois représentatifs (voir au § 2 du Rapport 563 la définition de N_0).

2.2 Variation du gradient d'indice de réfraction

Des mesures du gradient vertical de l'indice de réfraction dans les basses couches de l'atmosphère montrent que la gamme des valeurs de cet indice est extrêmement grande.

Aux Etats-Unis, le gradient vertical a été mesuré au Cap Kennedy, Floride, dans les 100 m au-dessus de la surface terrestre. On a constaté qu'il variait entre 230 N/km, valeur dépassée pendant 0,05 % du temps, et -370 N/km, valeur dépassée pendant 99,9 % du temps, ce qui correspond respectivement à une valeur de k de 0,4 et de -0,7 (terre concave) [Dougherty, 1968].

En France, des études effectuées dans la région parisienne, dans la même partie de l'atmosphère, c'est-à-dire dans les 100 m au-dessus de la surface terrestre, ont donné des résultats très semblables aux précédents. Toutefois, quand le gradient a été mesuré dans les 500 premiers mètres, les variations étaient bien moindres, les valeurs étant comprises entre 30 N/km (pendant 0,05 % du temps) et -140 N/km (pendant 99,8 % du temps), ce qui correspond à une valeur de k comprise entre 0,8 et 10.

Il résulte de mesures effectuées au Japon et au Royaume-Uni [Hall et Comer, 1969] que la variation du gradient dépend beaucoup de l'épaisseur des couches. Dans ces deux pays, les résultats des mesures ont été très semblables et ont montré que pour les premiers 100 mètres, les valeurs d'environ 70 N/km et -200 N/km ont été dépassées pendant 0,1 % et 99,9 % du temps. On a imaginé une méthode de prévision de la variation du gradient à partir de données de radiosondes; l'expérience a confirmé les résultats de cette méthode.

Des mesures effectuées en U.R.S.S. [Kalinin, 1964] ont montré que la distribution statistique du gradient vertical de l'indice de réfraction dans la couche de l'atmosphère comprise entre 0 et 200 m est voisine de la normale pour la plupart des régions climatiques de l'U.R.S.S. (sauf dans les régions montagneuses ou côtières). Les paramètres de cette distribution (valeur médiane et écart type) sont différents selon les régions climatiques et dépendent de la saison.

On a fait une analyse des résultats de radiosondage obtenus pendant cinq ans en certaines stations situées dans des zones tropicales [Hart et autres]; cette analyse a révélé que le pourcentage des valeurs extrêmes des gradients verticaux à la surface de la Terre, en dehors de la gamme 0 à -157 N/km, était plus grand que pour la plupart des stations des zones tempérées; il s'agissait de gradients moyens sur les quelques premières centaines de mètres au-dessus du sol. Pour les stations des zones tempérées, on voit nettement une distribution saisonnière des maxima et des minima des gradients extrêmes, mais cette tendance n'apparaît pas dans le cas des stations des zones tropicales.

Il y a cependant lieu de souligner que, pour ce qui est de la propagation des ondes, les valeurs extrêmes du gradient de l'indice de réfraction mesurées en un point sont moins importantes qu'on ne pourrait le supposer. Ces valeurs extrêmes correspondent à des conditions atmosphériques inhabituelles qui règnent sur une distance probablement très courte et en général inférieure à la longueur de la liaison

radioélectrique. Il convient donc de considérer également la corrélation dans l'espace des gradients de l'indice de réfraction en deux points du trajet, mais cette question n'a pas été suffisamment étudiée. Le gradient de l'indice de réfraction mesuré en un point (et surtout ses valeurs extrêmes) ne doit donc être utilisé qu'avec une grande prudence.

Toutefois, au Japon, l'observation simultanée de l'angle d'incidence sur un trajet de 30 km et le gradient dans une couche de 75 m au milieu du trajet, a révélé une assez bonne concordance entre ces grandeurs pendant une période d'un mois [Ikegami et autres, 1968].

Des mesures de l'angle d'arrivée effectuées en République Fédérale d'Allemagne à la fréquence 515 MHz, sur un trajet à visibilité optique de 70 km, montrent que la moyenne de la valeur de k prise sur la longueur de ce trajet ne présente pas un domaine de variation aussi grand qu'on pourrait s'y attendre d'après des observations météorologiques faites en un point isolé de ce trajet.

Des mesures de réfraction sur un trajet de 55 km en visibilité directe au Royaume-Uni [Bell, 1967] indiquent que la valeur effective de k dépasse 0,9 pendant 99,9 % du temps. Des mesures faites au Japon [C.C.I.R., 1970-1974a] à la fréquence 6,7 GHz sur un trajet de 112,7 km au-dessus de la mer, avec réflexion des ondes sur la surface de la mer, montrent que la valeur effective de k dépasse 0,99 pendant 99,9 % du temps.

Des mesures faites en Italie sur une liaison maritime de grande longueur (240 km), aux fréquences 900 MHz et 2164 MHz, montrent que l'on n'a relevé aucune valeur de k inférieure à l'unité au cours des 10 mois qu'ont duré les mesures (mois parmi lesquels se trouvait le mois le plus défavorable).

Il a été montré [Boithias et Battesti, 1967] que l'on peut, pour un climat tempéré continental (voir la Fig. 1), déterminer une valeur minimale effective de k en fonction de la longueur du trajet.

3. Corrélation entre la propagation transhorizon et des paramètres radiométéorologiques

Depuis de nombreuses années, on a été amené à tenir compte de la variation verticale de l'indice de réfraction dans de nombreuses mesures faites dans les pays tempérés. Afin de simplifier le problème, on a représenté l'atmosphère par la différence ΔN entre coïndice de réfraction à 1 km de hauteur et coïndice au sol. Dans un certain nombre de cas, on a établi théoriquement et vérifié expérimentalement qu'il existe une corrélation entre les variations du champ observé et la quantité ΔN . Cette corrélation n'a pu être clairement mise en évidence que dans les pays tempérés lorsque la comparaison se fait sur la base des valeurs médianes mensuelles ou tout au moins hebdomadaires [Saxton, 1951; Bean et Meany, 1955; Troitsky, 1958].

On a essayé d'améliorer la corrélation en tenant compte des conditions de l'atmosphère au voisinage du volume commun. On a étudié [Bolgiano, 1960; Misme, 1958a et 1961; Fukushima, 1967] l'influence de la stabilité et des mouvements de l'air. Cependant, ces paramètres ne semblent pas jouer des rôles comparables sous tous les climats. L'addition du gradient de l'indice de réfraction à la base du volume commun améliore la corrélation.

On a montré qu'un paramètre de la forme $T = aG_e + bG_o$ est représentatif de la moyenne mensuelle de l'affaiblissement de propagation pour des distances et des climats très différents [Battesti et autres, 1968]. L'expérience a conduit à donner aux coefficients a et b les valeurs respectives $-3/8$ et $-5/4$.

G_e est le gradient équivalent entre le sol et le volume commun (qui peut être souvent remplacé par la différence entre la valeur de N à 1 km au-dessus du sol et la valeur au sol).

G_o est la différence entre la valeur de N en un point situé à un kilomètre au-dessus de la base du volume commun et la valeur à cette base. L'altitude du volume commun était calculée grâce à G_e .

T est alors exprimé en dB par rapport à un zéro arbitraire.

Le paramètre T peut donc servir à calculer l'affaiblissement de propagation dans n'importe quel climat. La formule correspondante et les vérifications expérimentales qui en ont été faites sont données dans le Rapport 238-2.

Si l'on ne dispose pas de données pour déterminer G_e et G_o , on peut utiliser les diverses cartes reproduites dans l'ouvrage cité en [Bean et autres, 1961] et prendre pour valeur approchée du gradient G_e équivalent le gradient G_0 , soit dix fois la différence entre la valeur de N à une hauteur de 100 m au-dessus de la surface de la Terre et sa valeur à la surface de la Terre. On trouvera dans la référence [Bean et autres, 1961] des planisphères pour les mois de février, mai, août et novembre, donnant les valeurs de G_0 dépassées pendant 2 % et 10 % de chaque mois. Ces gradients correspondent aux valeurs de champ dépassées pendant 90 % et 98 % de chaque mois.

En combinant ces répartitions et en utilisant les méthodes décrites en [Bean et autres, 1961] pour obtenir les valeurs médianes de G_0 , ainsi que la réfraction à la surface de la Terre N_s , on peut estimer G_0 et N_s pour tous les pourcentages d'une année et obtenir ensuite la valeur approchée du gradient du volume commun G_c au moyen de la formule semi-empirique:

$$G_c \begin{cases} \frac{1}{3} [200 - N_s - \frac{2}{3} G_0] \text{ lorsque } 1 \text{ km} < D_s \theta < 2,7 \text{ km} \\ \frac{3}{7} [200 - N_s - \frac{2}{3} G_0] \text{ lorsque } D_s \theta \geq 2,7 \text{ km.} \end{cases}$$

Dans les cas typiques, les valeurs de N_s dépassées pendant 90 % et 99 % du temps atteignent respectivement les niveaux de 10 N et de 20 N environ au-dessous des valeurs médianes à long terme que l'on obtient par les méthodes décrites dans le Rapport 563 ou en [Boithias et Battesti, 1967].

On a aussi étudié une fonction de l'indice de réfraction potentiel [Flavell et Lane, 1962]. On peut remarquer que le gradient de cet indice potentiel est théoriquement lié à la mesure de la stabilité atmosphérique. Sur certaines liaisons en ondes décimétriques [C.C.I.R., 1970-1974b], on a constaté une corrélation entre l'épaisseur de la couche, entre 500 et 1000 mb, et les variations du champ. Il est cependant probable que cette corrélation n'existe pas dans le monde entier; par ailleurs, elle ne s'applique ni aux fréquences très inférieures à 1 GHz, ni aux trajets beaucoup plus courts que 300 km.

Dans certains cas, on a constaté qu'il existe une corrélation entre le gradient vertical de l'indice de réfraction et la valeur de cet indice à la surface de la terre [Bean et Meany, 1955; Misme, 1958b; Lane, 1961; Misme et autres, 1960] au moins pour les valeurs moyennes mensuelles [Wickerts, 1968]. Cette corrélation permet de déduire une atmosphère de référence de base dans laquelle N varie exponentiellement avec l'altitude ainsi qu'on le définit dans le Rapport 563.

On a constaté également qu'il existe une corrélation entre l'affaiblissement de transmission observé et les valeurs de l'indice de réfraction à la surface [Pickard et Stetson, 1947; Bean, 1956]; cependant, cela ne se produit, semble-t-il, que lorsqu'il existe une bonne corrélation entre le gradient vertical de l'indice de réfraction (par exemple ΔN) et la valeur de cet indice à la surface [Bean et Meany, 1955; Misme, 1958b; Lane, 1961; Misme et autres, 1960]. A partir des données météorologiques statistiques existantes, il est plus facile de déterminer la valeur de l'indice de réfraction à la surface que celle du gradient d'indice; pour déterminer celui-ci, il faut effectuer des mesures par radiosondes qui, en général, ont lieu chaque jour dans les observatoires météorologiques mondiaux, à des heures bien déterminées. On a étudié, aux Etats-Unis d'Amérique, d'une façon approfondie, la corrélation entre l'affaiblissement de transmission et la valeur de l'indice de réfraction à la surface, pour des distances très supérieures à celle de l'horizon. On a trouvé, entre les valeurs médianes, des coefficients de corrélation d'au moins 0,75 pour des périodes d'environ 10 jours. Dans les climats tempérés, on a constaté que le mois correspondant à l'affaiblissement de transmission le plus élevé est aussi celui qui correspond aux plus faibles valeurs de N_s , où N_s est la valeur de N au niveau du sol.

Si, dans ces régions, la variation annuelle de la moyenne mensuelle de N_s est petite (inférieure à 10-15 N environ), il ne faut pas nécessairement s'attendre à une bonne corrélation entre la variation de l'affaiblissement de propagation et la valeur moyenne mensuelle de N_s .

Dans d'autres climats, les données de corrélation dont on dispose ne permettent pas de conclure. Certaines mesures ont fait apparaître une bonne corrélation [Gray, 1959; Onoe et autres, 1958]; d'autres mesures révèlent une mauvaise corrélation [Boithias et Misme, 1964]. Dans ce dernier cas, la corrélation semble satisfaisante sauf pendant la période de l'année où N_s dépasse 350 environ. Toutefois, l'application de cette valeur en tant que critère mondial doit se faire avec prudence. Avec les quelques valeurs de données sur l'affaiblissement de transmission dont on dispose pour le sud des Etats-Unis (valeurs relevées en été, alors que N_s est supérieur à 350), on trouve que la corrélation avec N_s est presque la même que pour les mois d'hiver. Dans l'une de ces études [Bean et Cahoon, 1961] où l'on a calculé les régressions selon les cycles annuels de la moyenne mensuelle de N_s et de l'affaiblissement de transmission médian mensuel, le coefficient de corrélation moyen sur neuf trajets, où les moyennes de N_s sont comprises entre les valeurs approximatives de 360 et 370 durant l'été, était de 0,70, alors que sur les onze autres trajets, où N_s était généralement bien inférieur à 350, on a constaté que la corrélation moyenne ne dépassait pas 0,69. Il semble que la détérioration de la corrélation observée dans les autres régions du monde ait une cause trop complexe pour que l'on puisse la représenter par un paramètre aussi simple que N_s et qu'elle soit due aux caractéristiques verticales des masses d'air (par exemple, la subsidence).

On a trouvé que N_s était souvent utile pour prévoir les variations de l'affaiblissement de transmission régionales, saisonnières et diurnes, mais de peu de valeur pour prévoir ces variations dans les régions tropicales et équatoriales.

C'est pourquoi on estime nécessaire de poursuivre ces études dans les régions du monde de climats variés.

A titre indicatif, on peut signaler que si ΔA est égal à la variation de la médiane mensuelle des affaiblissements de propagation en dB, $\Delta(N_s)$ la variation de la moyenne mensuelle de N_s en unités N , $\Delta(\Delta N)$ la variation de la médiane mensuelle de ΔN en unités N , α_1 et α_2 des coefficients de proportionnalité en unités correspondantes, et dans la limite des réserves précédentes, on peut écrire:

$$\Delta A = \alpha_1 \Delta(N_s) \text{ et } \Delta A = \alpha_2 \Delta(\Delta N)$$

On a trouvé expérimentalement:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,2 \text{ aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon,} \\ &= 0,6 \text{ en France et en République Fédérale d'Allemagne.} \end{aligned}$$

Le Doc. V/45, (U.R.S.S.), Genève, 1965, montre que α_1 varie avec la distance.

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,5 \text{ aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon,} \\ &= 0,9 \text{ en France, mais certaines années on n'a observé aucune proportionnalité entre } \Delta A \\ &\text{ et } \Delta(\Delta N), \end{aligned}$$

α_2 n'a été mesuré ni en République Fédérale d'Allemagne ni en U.R.S.S.

Au Royaume-Uni, la validité de ces proportionnalités n'a pas été établie.

Pour les autres pays, on ne possède pas de valeurs pour α_1 et α_2 .

Des données statistiques sur ΔN , ainsi que des renseignements sur l'influence des facteurs synoptiques, sont fournis par la Pologne dans [Pawlowski, 1970].

4. Affaiblissement

4.1 Généralités

Aux fréquences supérieures à environ 3 GHz, l'affaiblissement des ondes radioélectriques et les contributions à la température de bruit du système résultant de l'absorption et de la diffusion par les gaz atmosphériques et les gouttes d'eau deviennent de plus en plus importants. Il convient d'en tenir compte dans la conception des systèmes de télécommunication fonctionnant dans cette gamme de fréquences. L'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques est presque uniquement dû à l'absorption par l'oxygène neutre et la vapeur d'eau. La présence de l'eau liquide, facteur d'atténuation, peut exercer un effet, qu'elle se présente sous forme de pluie, de nuages ou de brouillard. L'affaiblissement résulte alors tant de la diffusion que de l'absorption, l'importance relative de ces deux phénomènes dépendant du diamètre des particules d'eau par rapport à la longueur d'onde. L'affaiblissement causé par la neige peut également devenir tellement important aux fréquences supérieures à 60 GHz que, selon l'état de la neige, il peut même dépasser l'affaiblissement produit par la pluie, pour un taux de précipitation équivalent [Misme, 1966].

Un certain affaiblissement supplémentaire peut également provenir des effets de défocalisation et de non-cohérence des fronts d'onde, produits par les variations de l'indice de réfraction.

4.2 Absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau

La vapeur d'eau a une raie de résonance à la fréquence 22,23 GHz et l'oxygène, une bande moins aiguë autour de 60 GHz (causée par une série de raies élargies par la pression existant dans l'atmosphère inférieure), ainsi qu'une raie à 120 GHz.

La Fig. 2, établie après l'étude d'un article [NBS, 1967], indique les valeurs respectives des coefficients d'absorption γ_{o0} et γ_{w0} par l'oxygène et la vapeur d'eau, déterminées pour les conditions normalisées de pression et de température à la surface de la Terre pour une humidité absolue de 10 g/m³ (approximativement égale à un rapport de mélange de 7,6 g/kg).

4.3 Affaiblissement dû aux précipitations

L'affaiblissement dû à la pluie excède pour les forts pourcentages de temps l'absorption par l'oxygène et par la vapeur d'eau réunies. Il est causé par l'absorption de l'énergie dans les gouttelettes et dans une moindre mesure par la diffusion de l'énergie en dehors du faisceau de l'antenne.

En pratique, on a trouvé utile d'exprimer l'affaiblissement par la pluie en fonction du taux de précipitations R qui dépend à la fois du contenu en eau liquide et de la vitesse de chute des gouttes; cette dernière dépend à son tour de la dimension des gouttes. Il semblerait que la pluie d'un taux de précipitation connu a plusieurs distributions des dimensions des gouttes, et le problème de l'estimation de l'affaiblissement des ondes radioélectriques par plusieurs types de précipitations est difficile.

L'absorption totale A_r causée par la pluie sur un trajet de longueur r_0 peut être déterminée en intégrant le coefficient d'absorption par la pluie $\gamma_r(r)$ le long du trajet direct entre deux antennes en visibilité mutuelle:

$$A_r = \int_0^{r_0} \gamma_r(r) dr \quad \text{dB}$$

On a effectué différentes études théoriques [Ryde et Ryde, 1945; Medhurst, 1965; Oguchi, 1964] afin d'évaluer l'absorption par la pluie en fonction de la fréquence et du taux de précipitation, en se fondant sur des distributions normalisées des dimensions des gouttes [Laws et Parsons, 1943]. On a trouvé [Gunn et East, 1954] que les résultats de ces études peuvent être résumés, avec une bonne approximation, par l'expression empirique suivante:

$$\gamma_r = KR^\alpha \quad \text{dB/km}$$

où R représente le taux de précipitation en mm/h. Cette relation est illustrée par la Fig. 3a qui tient compte de l'influence de la fréquence sur K et sur α . Les courbes sont applicables pour une température de 18° C, mais elles peuvent être utilisées dans le cas d'autres températures, moyennant l'introduction d'un facteur de correction [Ryde et Ryde, 1945]. La Fig. 3b représente un nomogramme qui fournit les mêmes données.

On a démontré que, pour les besoins de la pratique, on peut considérer α comme voisin de l'unité dans une large gamme de fréquences inférieures à environ 50 GHz [Medhurst, 1965; Blevis et autres, 1967].

Les Fig. 3a et 3b doivent être considérées comme donnant des valeurs théoriques obtenues en supposant que les gouttes d'eau ont une vitesse de chute connue. De ce fait, il convient de les utiliser avec prudence. Certains résultats expérimentaux peuvent être nettement différents de ces valeurs théoriques [Medhurst, 1965]. Toutefois, des travaux récents dans lesquels on mesurait simultanément, d'une part l'affaiblissement dans la gamme 20 à 36 GHz, et, d'autre part, le taux de précipitation (mesure détaillée) le long du trajet ont fait apparaître une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de l'affaiblissement [Norbury et White, 1972; C.C.I.R., 1970-1974c]. Au-dessus de 100 GHz, l'affaiblissement croît beaucoup moins vite avec la fréquence. En première approximation, pour les intensités de pluie supérieures à 15 mm/h, on peut même supposer l'affaiblissement constant entre 100 et 1000 GHz, ceci pour une distribution donnée des diamètres des gouttes d'eau. Mais, à ces fréquences, cette distribution est un facteur plus important qu'en dessous de 100 GHz et des variations importantes dans l'affaiblissement peuvent être produites, à une fréquence donnée, par un changement même faible dans la distribution des diamètres, ceci à intensité de pluie constante. A la suite d'études sur la corrélation spatiale des taux des précipitations, l'emploi d'un facteur de réduction a été proposé pour les trajets de Terre, comme moyen de rattacher la statistique de l'affaiblissement dû aux précipitations sur un trajet réel à la distribution de probabilité cumulative des précipitations en un point. La valeur du facteur de réduction, qui est fonction de la longueur du trajet, dépend également de la moyenne dans le temps (et par conséquent dans l'espace) des données sur les précipitations en un point [Bussey, 1950]. Les valeurs de ces facteurs de réduction, qui concordent approximativement avec les résultats d'études effectuées dans plusieurs pays [Battesti et autres, 1971; Morita et Higuti, 1971] sont indiquées à la Fig. 4. Ces facteurs de réduction (liés à la distribution annuelle) doivent être utilisés avec précaution, notamment aux fréquences égales ou supérieures à environ 30 GHz; il convient de poursuivre l'étude de cette caractéristique des précipitations.

On a peu étudié expérimentalement jusqu'ici le cas des fréquences supérieures à 50 GHz. Les travaux les plus récents dans ce domaine [Misme, 1966; Lane et autres, 1967] conduisent cependant à penser que, sauf pour des taux de précipitations peu importants, les affaiblissements observés sont inférieurs à ceux que laissent prévoir les considérations théoriques. On a récemment communiqué

quelques résultats de mesures effectuées aux fréquences de 110 et 890 GHz [Llewellyn-Jones et Zavody, 1971]. Il convient néanmoins de poursuivre les études aux fréquences supérieures à 50 GHz, du fait que, à ces fréquences, l'affaiblissement dépend étroitement de la distribution des dimensions des gouttes d'eau.

Les valeurs statistiques de l'affaiblissement sont susceptibles d'importantes variations, selon les conditions climatiques prévalant dans la région et selon la période et la méthode d'observation. Il est probable que les précipitations qui se produisent pendant la mousson constituent un problème particulier.

4.4 Précipitations au cours du mois le plus défavorable

Les données radiométéorologiques rassemblées dans le Rapport 563 montrent la difficulté de connaître les intensités de précipitations au cours du mois où elles sont les plus fortes, dans de très faibles pourcentages de temps inférieurs à 0,01. Cependant, compte tenu des besoins exprimés par les ingénieurs en télécommunications, il est nécessaire d'estimer ces intensités. Les études faites dans certains pays ont montré que le pourcentage du mois le plus défavorable qui correspond à une intensité de précipitation importante, est environ 4 fois plus élevé que le pourcentage de l'année qui correspond à la même intensité. Cette valeur dépend probablement du climat et de nouvelles mesures sont nécessaires.

A titre provisoire, on propose que cette relation serve à définir l'intensité de précipitations pendant le mois le plus défavorable.

5. Rotation apparente du plan de polarisation

5.1 Rôle des trajets multiples

L'existence d'irrégularités atmosphériques produit des trajets multiples qui non seulement sont responsables de la variation du niveau reçu, mais qui de plus font apparaître une composante ayant une polarisation orthogonale à la polarisation de l'onde émise. Ce phénomène a pour conséquence que le rapport entre les niveaux reçus sur deux polarisations orthogonales, appelé « découplage de polarisation », est continuellement variable, les niveaux reçus sur chacune des deux composantes étant pratiquement sans corrélation. Des valeurs expérimentales de cet effet sont données dans le Rapport 338-2.

5.2 Rôle des précipitations

Par suite de la non-sphéricité des gouttes d'eau et de l'inclinaison de leurs trajectoires, on constate des variations du découplage entre polarisations orthogonales. Cet effet a fait l'objet de calculs théoriques [Oguchi, 1962; Thomas, 1971] pour les fréquences supérieures à quelques GHz. Pour appliquer ces calculs, il faut connaître l'ellipticité des gouttes d'eau et l'angle de leur trajectoire avec la verticale. Ces données sont rarement disponibles. Quelques mesures ont pu vérifier le bien-fondé des calculs théoriques [Taner, 1973]. Cependant dans la pratique, on se contente de mesurer la variation du découplage des polarisations orthogonales. Il semble qu'en général, le découplage est bien corrélé à l'affaiblissement par la pluie et qu'il devienne plus faible lorsque l'affaiblissement augmente. Le résultat de mesures expérimentales est donné dans le Rapport 338-2.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATTESTI, J., BOITHIAS, L. et MISME, P. [mai-juin 1968] Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques. *Ann. des télécomm.*
- BATTESTI, J., BOITHIAS, L. et MISME, P. [novembre-décembre 1971] Détermination de l'affaiblissement dû à la pluie aux fréquences supérieures à 10 GHz. *Ann. des télécomm.*
- BEAN, B.R. [mars 1956] Some meteorological effects on scattered radio waves. *IRE Trans. on Commun. Systems*, CS-4, 1, 32-38.
- BEAN, B.R. et CAHOON, B.A. [novembre 1957] The use of surface weather observations to predict the total atmospheric bending of radio waves at small elevation angles. *Proc. IRE*, Vol. 45, 11.
- BEAN, B.R. et CAHOON, B.A. [1961] Correlation of monthly median transmission loss and refractive index profile characteristics. *NBS Journ. of Research*, 65D, 1.
- BEAN, B.R. et MEANY, F.M. [octobre 1955] Some applications of the monthly median refractivity gradient in tropospheric propagation. *Proc. IRE*, 43, 10, 1419-1431.

- BEAN, B.R., THAYER, G.D., et CAHOON, B.A. [1961] A world atlas of the atmospheric radio refractive index. ESSA Monograph 1.
- BELL, J. [1967] Propagation measurements at 3, 6 and 11 GHz over a line-of-sight radio path. *Proc. I.E.E.*, 114, 5, 545.
- BLEVIS, B.C., DOHOO, R.M. et MCCORMICK, K.S. [1967] Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. *IEEE Trans.*, Vol. AP-15, 394-403.
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1967] Nouvelles expérimentations sur la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Ann. des télécomm.*
- BOITHIAS, L. et MISME, P. [novembre-décembre 1964] Limite d'utilisation de l'indice de réfraction au sol. *Ann. des télécomm.* Vol. 19.
- BOLGIANO, R. [mai-juin 1960] A theory of wavelength dependence in ultra high frequency transhorizon propagation based on meteorological considerations. *NBS Journ. of Research*, Part D, 3.
- BUSSEY, H.E. [juillet 1950] Microwave attenuation statistics estimated from rainfall and water vapor statistics. *Proc. IRE*, 38, 781-785.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/162, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/5, Allemagne (République Fédérale d').
- C.C.I.R. [1970-1974c] Doc. 5/56, Pays-Bas.
- DOUGHERTY, H.T. [1968] A survey of microwave fading mechanisms, remedies, and applications. ESSA Tech. Rept. ERL69-WPL 4.
- FLAVELL, R.G. et LANE, J.A. [1962] The application of potential refractive index in tropospheric wave propagation. *J. Atm. Terr. Phys.*, 24.
- FUKUSHIMA, M. [août 1967] Some investigations of the effect of mountain wave on the distribution of the atmospheric refractive index. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Series II, 45.
- GRAY, R.E. [1959] Refractive index of the atmosphere as a factor in tropospheric propagation far beyond the horizon. *Elec. Comm.*, 36, 60.
- GUNN, K.L.S. et EAST, T.W.R. [1954] The microwave properties of precipitation particles. *Quar. J. Roy. Meteorological Soc.* London, 80, 522-545.
- GUNN et KINZER [1949] The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteorol.*, 6, 4, 249.
- HALL, M.P.M. et COMER, C.M. [mai 1969] Statistics of tropospheric radio-refractive-index soundings taken over a 3-year period in the United Kingdom. *Proc. I.E.E.* Vol. 116, 5, 685-690.
- HART, B.A., THAYER, G.D. et DOUGHERTY, H.T., Local and diurnal variations in ground-based radio refractivity gradients at tropical locations. Office of Telecommunications Tech. Res. and Eng. Rept. OT/TRER 23.
- IKEGAMI, F., AKIYAMA, T., AOYAGI S. et YOSHIDA, H. [mars 1968] Variation of radio refraction in the lower atmosphere. *IEEE Trans.*, Vol. AP-16, 3.
- KALININ, A.I. [1964] *Calculs de liaisons par faisceaux hertziens* (en russe), Sviáz, Moscou, 128-135.
- LANE, J.A. [1961] The radio refractive index gradient over the British Isles. *J. Atm. Terr. Phys.*, 21.
- LANE, J.A., GORDON-SMITH, A.C. et ZAVODY, A.M. [1967] Absorption and scintillation effects at 3 mm wavelength on a short line-of-sight radio link. *Electronics Letters*, 3, 185.
- LAWS, J.O. et PARSONS, D.A. [1943] The relation of raindrop size to intensity. *Trans. American Geophys. Union*, Vol. 24, 452-460.
- LLEWELLYN-JONES, D.T. et ZAVODY, A.M. [1971] Rainfall attenuation at 110 and 890 GHz. *Electronics Letters*, 7, 12.
- MEDHURST, R.C. [1965] Rainfall attenuation of centimetre waves: Comparison of theory and measurement. *IEEE Trans.*, Vol. AP-13, 4, 550-564.
- MISME, P. [1958a] Corrélation entre le champ à grande distance et un nouveau paramètre radiométéorologique. *Transactions of PGAP*, AP-6, 3.
- MISME, P. [1958b] Essai de radioclimatologie d'altitude dans le nord de la France. *Ann. des télécomm.* Vol. 15, 92.
- MISME, P. [1960] Le gradient équivalent: mesure directe et calcul théorique. *Ann. des télécomm.* Vol. 15, 92.
- MISME, P. [1961] Influence du gradient équivalent et rôle de la stabilité atmosphérique dans les liaisons transhorizon au Sahara et au Congo. *Ann. des télécomm.* Vol. 16, 5-6.
- MISME, P. [novembre-décembre 1966] Etude expérimentale de la propagation des ondes millimétriques dans les bandes des 5 et des 3 mm. *Ann. des télécomm.*
- MISME, P., BEAN, B.R. et THAYER, G.D. [août 1960] Models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, Vol. 48, 8.
- MORITA, K. et HIGUTI, I. [1971] Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain. *Rev. of Elec. Comm. Labs.*, Japon, 7-8, 798.
- NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101 Revised, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
- NORBURY, J.R. et WHITE, W.J.K. [1972] Microwave attenuation at 35,8 GHz due to rainfall. *Electronics Letters*, 8, 91.
- OGUCHI, T., [1962] Statistical illustration of amplitude and phase of radio signals passing through the rain, *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 9, 51-72.
- OGUCHI, T. [janvier 1964] Attenuation of electromagnetic waves due to rain with distorted raindrops. *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 11, 19-37.
- ONOE, M. et autres [avril 1958] Results of experiments of long-distance overland propagation of ultra-short waves. *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 5, 20.
- PAWLOWSKI, W. [1970] Situation synoptique et gradient du coïndice (en polonais), *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdanskiej. Elektronika*, 163, 26.

- PICKARD, G.W. et STETSON, H.T. [décembre 1947] A study of tropospheric reception at 428 Mc/s and meteorological conditions. *Proc. IRE*, 35.
- RYDE, J.W. et RYDE, D. [1945] Attenuation of centimetre waves by rain, hail, fog and clouds. General Electric Co., Wembley, England.
- SAXTON, J.A. [1951] Propagation of metre waves beyond the normal horizon. *Proc. I.E.E.*, Part III.
- TANER, R.R. [avril 1973] Cross-polarization experiment. COMSAT Tech. Memo CL-14-73.
- THOMAS, D.T. [octobre 1971] Cross-polarization distortion in microwave transmission due to rain. *Radio Science*, 6, 833-839.
- TROITSKY, N.V. [1958] Evanouissement des ondes ultra-courtes dans les faisceaux hertziens (en russe). *Elektrosviaz*, 10.
- WICKERTS, S. [1968] Atmosphère radiométéorologique normale (en suédois). Institut de recherche du Ministère de la Défense nationale, Dépt. 3, Rapport A 3704-60.

ANNEXE

Les climats considérés dans le Rapport 238-2 sont décrits ci-après :

1. **Climat équatorial :** ce climat correspond à la zone entre les latitudes 10° N et 10° S. Il est caractérisé par une température élevée, à faibles variations et par des pluies fortes et continues qui entretiennent une humidité permanente. La valeur moyenne annuelle de N_s (réfractivité à la surface terrestre = $(n - 1) 10^6$, où n est l'indice de réfraction de l'air) est d'environ 360 unités N et la gamme annuelle des variations de 0 à 30 unités N .
2. **Climat intertropical continental :** ce climat correspond aux zones comprises entre 10° et 20° de latitude. Il est caractérisé par un hiver sec et un été pluvieux. Les conditions de propagation radioélectrique présentent des variations journalières et annuelles marquées, l'affaiblissement étant moindre durant la saison pluvieuse. Lorsque les terres sont sèches, il peut y avoir des conduits troposphériques pendant une très importante partie de l'année. La valeur moyenne annuelle de N_s est d'environ 320 unités N et la gamme des variations sur toute l'année des valeurs moyennes mensuelles de N_s va de 60 à 100 unités N .
3. **Climat intertropical maritime :** ce climat correspond également aux zones comprises entre 10° et 20° de latitude et se rencontre d'ordinaire sur les basses terres voisines de la mer. Il est fortement influencé par la mousson. La mousson d'été, qui souffle de la mer vers la terre, apporte une humidité élevée dans les basses couches de l'atmosphère. Bien que l'affaiblissement des ondes radioélectriques soit relativement faible tant au début qu'à la fin de l'époque de la mousson, au milieu de la mousson, l'atmosphère est uniformément humide jusqu'à des altitudes élevées et l'affaiblissement augmente fortement en dépit d'une valeur très élevée de N_s . La moyenne annuelle de N_s est d'environ 370 unités N et la gamme de ses variations au cours de l'année va de 30 à 60 unités N .
4. **Climat désertique :** ce climat correspond à deux zones situées approximativement entre 20° et 30° de latitude. Pendant toute l'année, il y règne des conditions de zone semi-aride et les variations journalières et saisonnières de la température y sont extrêmes. Ce climat est très défavorable au mode de propagation par diffusion, particulièrement en été. La valeur moyenne annuelle de N_s est d'environ 280 unités N et, sur toute l'année, les valeurs moyennes mensuelles peuvent varier de 20 à 80 unités N .
5. **Climat méditerranéen :** ce climat correspond aux régions des deux hémisphères situées en bordure des zones désertiques, près de la mer, entre 30° et 40° de latitude. Ce climat est caractérisé par une température assez élevée, tempérée par la présence de la mer et une absence complète de pluies durant l'été. Les conditions de propagation y varient fortement, en particulier sur les trajets maritimes où, durant l'été, se forment souvent des conduits troposphériques.
6. **Climat continental tempéré :** ce climat correspond aux zones comprises entre 30° et 60° de latitude. Sur une masse terrestre importante, un tel climat présente des températures extrêmes et on peut s'attendre à y rencontrer des variations journalières et saisonnières marquées des conditions de propagation. Les régions occidentales des continents sont fortement influencées par les océans, aussi les variations de température y sont-elles plus modérées et il peut y avoir des chutes de pluies à n'importe quelle époque de l'année. A mesure que l'on va vers l'est, les variations de température sont plus fortes et il y a moins de pluies l'hiver. Les conditions de propagation sont plus favorables durant l'été et elles présentent d'assez fortes variations au cours de l'année. La valeur moyenne annuelle de N_s est d'environ 320 unités N et, sur toute l'année, ses valeurs moyennes mensuelles peuvent varier de 20 à 40 unités N .

- 7a. Climat maritime tempéré, zones terrestres:** ce climat correspond également à des régions comprises entre 30° et 60° de latitude, où les vents dominants, qui ne rencontrent aucune montagne pour leur faire obstacle, amènent à l'intérieur des terres un air maritime humide. Le Royaume-Uni, les côtes ouest de l'Amérique du Nord et de l'Europe et les régions côtières du nord-ouest de l'Afrique constituent des exemples caractéristiques de telles régions. La valeur moyenne annuelle de N_s y est d'environ 320 unités N et la variation des moyennes mensuelles toute l'année est assez faible puisqu'elle est de 20 à 30 unités N . Les îles du Japon se trouvent sous de telles latitudes mais le climat y est quelque peu différent et présente une plus large gamme de variations des valeurs moyennes mensuelles de N_s puisqu'elle est d'environ 60 unités N . Au Japon, les vents dominants ont traversé auparavant une importante masse terrestre et le terrain est accidenté. Le climat du Japon se rapproche donc sans doute davantage du climat 6 que du climat 7 mais, pendant un pourcentage du temps qui peut atteindre 5 %, dans les régions côtières et les régions maritimes adjacentes, la propagation par conduits troposphériques peut être importante.
- 7b. Climat maritime tempéré, zones maritimes:** ce climat correspond aux zones côtières et maritimes dans des régions analogues à celles où règne le climat 7a. La distinction repose sur ce que l'on considère qu'un trajet de propagation, dont les deux horizons sont sur la mer, constitue un trajet maritime (quand bien même les extrémités du trajet se trouveraient à l'intérieur des terres); ceci mis à part, le climat 7a est considéré comme pouvant s'y appliquer. Pendant une assez faible partie du temps, il se produit très fréquemment des conduits troposphériques entre le Royaume-Uni et le continent européen et le long des côtes occidentales des Etats-Unis d'Amérique et du Mexique.
- 8. Climat polaire:** ce climat correspond approximativement aux zones situées entre les latitudes 60° et les pôles. Il est caractérisé par des températures relativement basses et un volume de précipitations relativement faible. On ne dispose pas actuellement de courbes de propagation que l'on puisse insérer dans le présent Rapport.

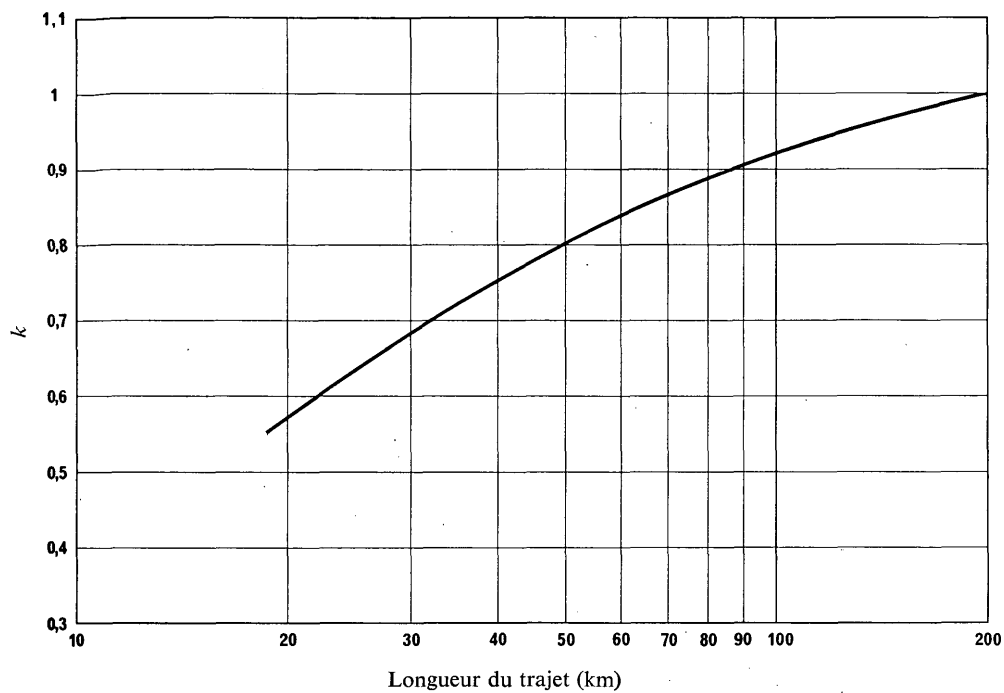


FIGURE 1

Valeur minimale de k dépassée durant approximativement 99,9% du temps
(Climat tempéré continental)

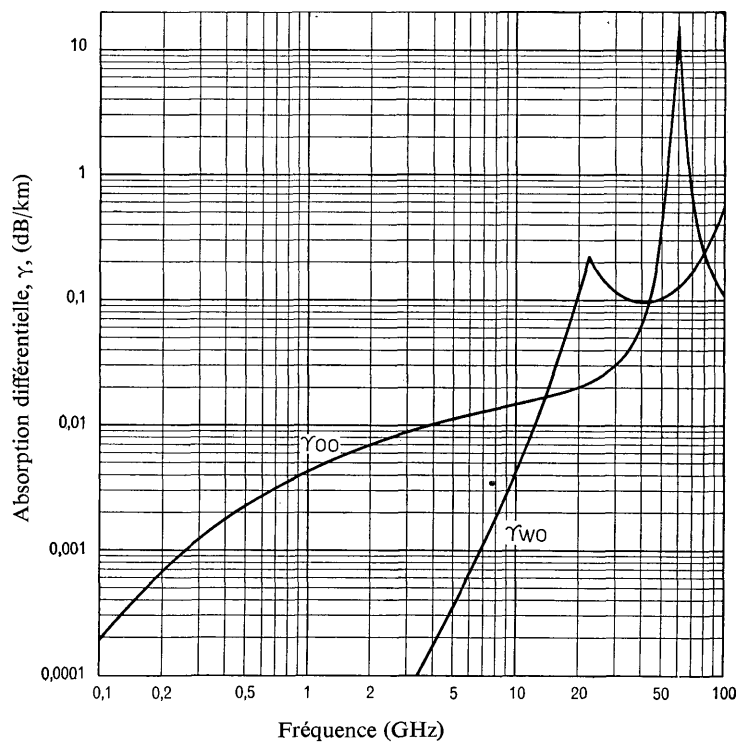


FIGURE 2

Valeurs γ_{O_0} et γ_{W_0} de l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau

Pression: 760 mm Hg Température: 20° C

Densité de la vapeur d'eau: 10 g/m³ = 7,6 g/kg

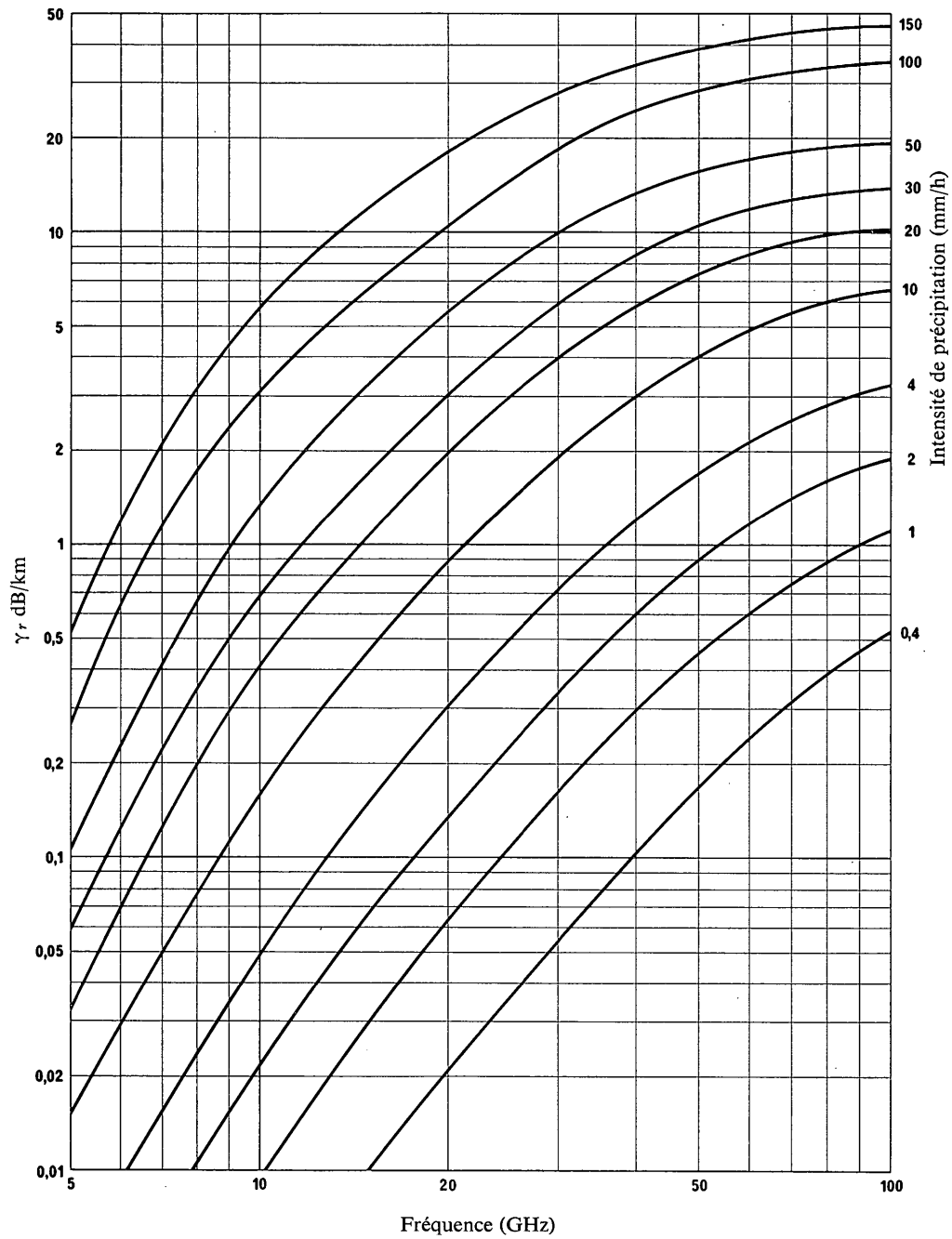


FIGURE 3a

Variation de γ_r en fonction de la fréquence

Ces courbes sont fondées sur les hypothèses suivantes:

- La distribution des dimensions des gouttes suit la loi de Laws et Parsons
- La température est de 18° C
- La vitesse terminale des gouttes de pluie est celle qu'ont mesurée Gunn et Kinzer [1949]

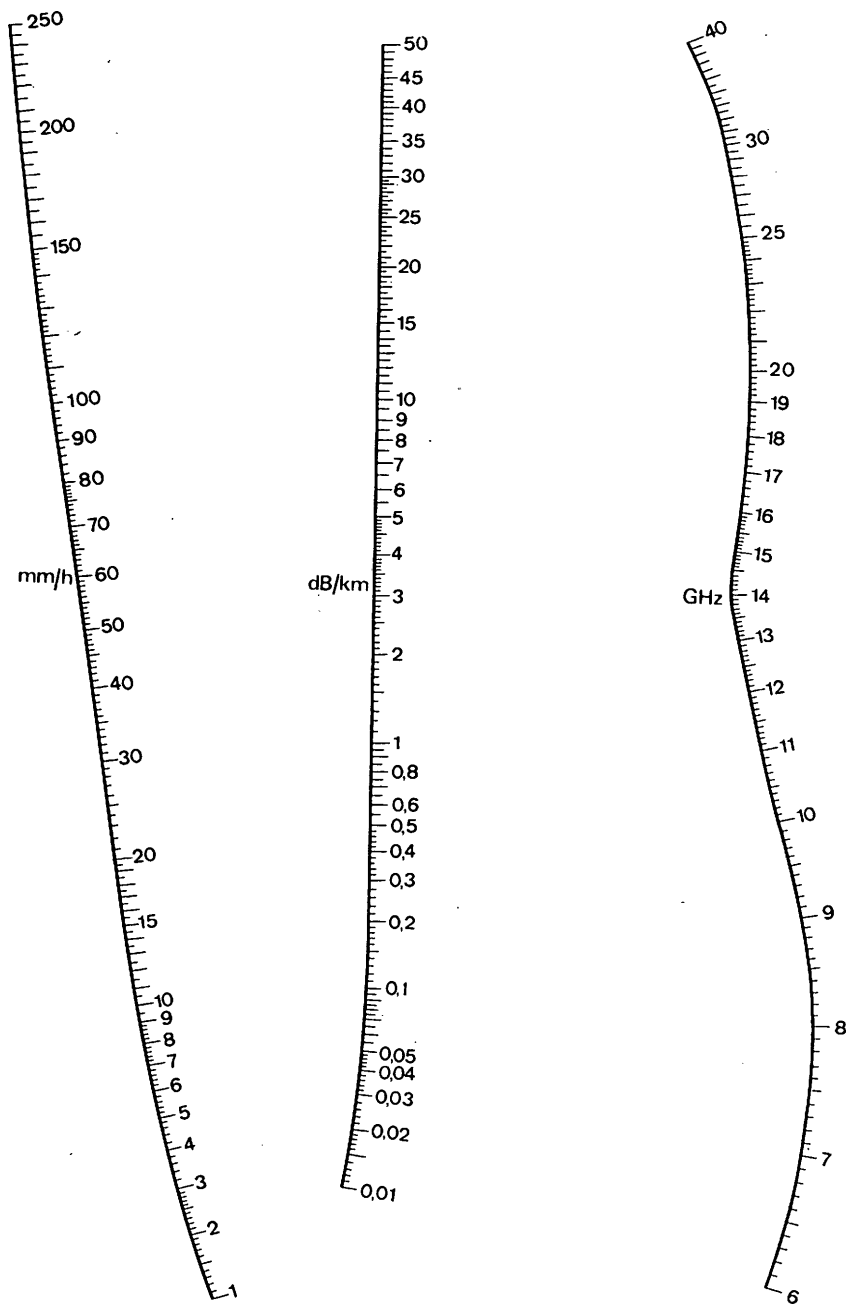


FIGURE 3b

Affaiblissement dû à la pluie par km

Distribution de Laws et Parsons

Température 18° C

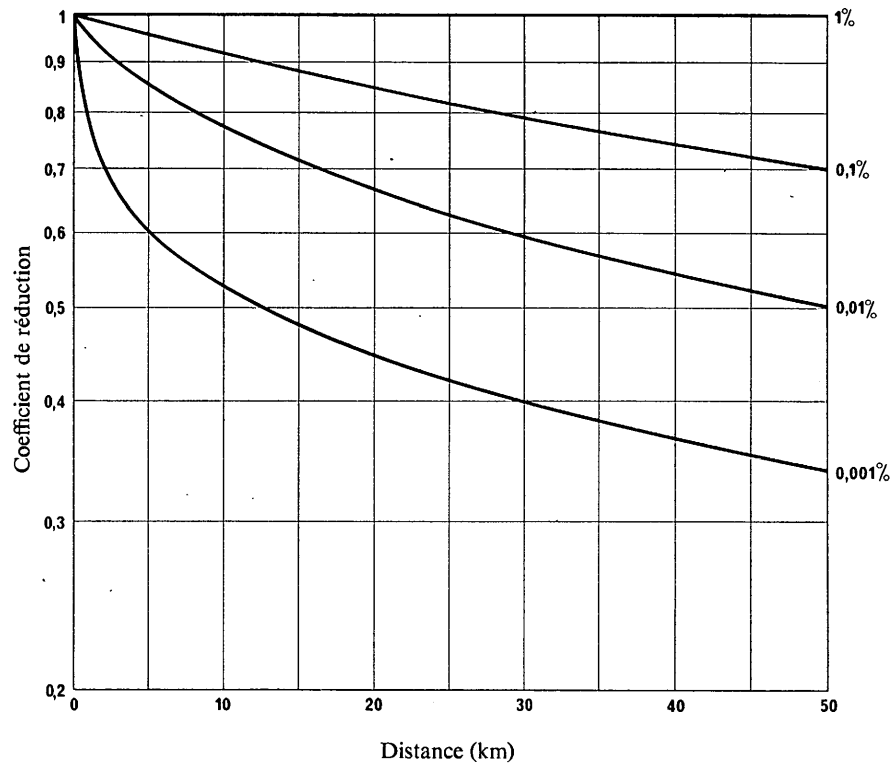


FIGURE 4

Coefficient de réduction des intensités de précipitations

RAPPORT 234-3 *

INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE NON IONISÉE
SUR LA PROPAGATION DES ONDES

Propagation Terre-espace

(Question 2-2/5)

(1963 – 1966 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Dans la propagation à travers les régions non ionisées de l'atmosphère, les variations spatiales de l'indice de réfraction peuvent causer une réfraction et une diffusion des ondes. En outre, les gaz atmosphériques et les précipitations donnent lieu à un affaiblissement qui peut devenir important aux fréquences supérieures à environ 1 GHz. Le présent Rapport expose brièvement les principales caractéristiques de l'affaiblissement atmosphérique, y compris les facteurs essentiels qui provoquent des affaiblissements du signal par temps clair, un affaiblissement dû aux précipitations, la réfraction et ses effets, plus spécialement du point de vue des trajets Terre-espace.

2. Réfraction et ses effets

2.1 Courbure du rayon dans la troposphère

Du point de vue théorique, le calcul de la réfraction est bien connu. On rappelle que la courbure $1/p$ du trajet radioélectrique en un point est donnée par $1/p = 1/n \cos \varphi \, dn/dh$ où n est l'indice de réfraction, φ l'angle du trajet et de l'horizontale au point considéré et dn/dh le gradient vertical de l'indice de réfraction. La variabilité de ce gradient détermine celle de la courbure.

Les informations publiées au sujet de la courbure du rayon des ondes électromagnétiques à leur traversée de l'atmosphère sont peu nombreuses. Des mesures utilisant des techniques radar ont été décrites [Fannin et Jehn, 1957; Anderson et autres, 1960]. Des mesures utilisant un radiomètre observant la position apparente du Soleil ont aussi été décrites [Anway, 1961] et on a fait des observations sur la variabilité de la réfraction en utilisant des techniques de phase [Norton et autres, 1961].

Devant la difficulté de mesurer systématiquement dn/dh on a utilisé la corrélation entre la quantité ΔN et l'indice au sol. Cette corrélation semble souvent élevée (voir le Rapport 233-3). Il s'ensuit que l'on a estimé la courbure du trajet radioélectrique en fonction de l'indice au sol.

En considérant les mesures du « Weather Bureau » de la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude [Schulkin, 1952], des études analytiques de la réfraction ont été conduites en la considérant comme une fonction des valeurs de l'indice de réfraction à la surface de la Terre: N_s . Au Royaume-Uni, on a fait une étude statistique de la courbure du rayon pour de faibles angles de site. Pour ce faire, on a utilisé les mesures — effectuées à l'aide de ballons captifs — de la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude, dans le premier kilomètre au-dessus de la surface de la Terre [C.C.I.R., 1966-1969a]. Dans les références [Bean et autres, 1960; Bean et Thayer, 1963], on a montré que N_s est un bon paramètre utilisable pour prévoir la réfraction à travers l'atmosphère (voir également le Rapport 233-3). Cependant, quelques doutes ont été exprimés sur la possibilité d'utiliser N_s dans les régions équatoriales [Misme et autres, 1960]. Le gradient équivalent peut aussi être employé pour déterminer la courbure, mais le calcul de ce paramètre est difficile car une connaissance de la variation de l'indice de réfraction avec l'altitude est nécessaire.

On observe qu'une grande partie de la courbure d'un rayon se produit dans la partie la plus dense et la plus variable de l'atmosphère, tout près de la surface de la Terre. Dans le cas d'une propagation Terre-espace, les erreurs affectant l'angle de site apparent d'un satellite, sous l'effet de la réfraction, diminuent lorsque le satellite se déplace de l'horizon vers le zénith. Par exemple, si l'on suppose une très grande valeur de N_s , $N_s = 450$, dans l'atmosphère de référence (voir le Rapport 563), la correction

* Ce Rapport, qui a été adopté à l'unanimité, doit être porté à la connaissance des Commissions d'études 2, 4 et 9.

sur l'angle de site diminue de 32 à 5 milliradians quand l'angle de site augmente de 0 à 52 milliradians (0 à 3°) [Bean et Dutton, 1966]. Si un tel trajet traverse l'atmosphère à des altitudes toujours supérieures à plusieurs kilomètres, comme c'est le cas si la station terminale terrienne est à haute altitude, il évite les régions denses et variables de l'atmosphère, sa courbure totale est moindre et les modèles atmosphériques mentionnés plus haut sont toujours utilisables.

La précision requise pour pointer une antenne est d'autant plus élevée que le faisceau d'antenne est plus étroit. Les modèles d'atmosphère mentionnés plus haut sont parfois insuffisants pour permettre de déterminer la direction de pointage de l'antenne; dans ces conditions, il faut utiliser les valeurs mesurées de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude.

Pour obtenir une précision adéquate lors du calcul de l'angle de site requis, des corrections sont nécessaires pour tenir compte du fait que la propagation n'est pas rectiligne. Pour une erreur ne dépassant pas 10^{-4} radian pendant 99,5 % du temps à tous les angles de site inférieurs à 10°, il faut tenir compte de la variation effective de l'indice de réfraction avec la hauteur; si l'angle de site est compris entre 10° et 50°, il suffit d'opérer une correction calculée à partir d'un modèle donné dans le Rapport 563 aux angles de site supérieurs à 50°, il n'y a pas besoin de faire de correction.

Des expériences faites en Inde ont mesuré la variation du trajet apparent entre le sol et un point de l'atmosphère [C.C.I.R., 1970-1974a].

L'affaiblissement du signal peut être causé également par une défocalisation atmosphérique [Crane, 1971; Yokoi et autres, 1970] qui se produit par suite de l'étalement du faisceau de l'antenne causé par des variations de la réfraction atmosphérique en fonction de l'angle de site. Cet effet devrait être négligeable pour tous les angles de site supérieurs à 3° environ.

2.2 Scintillations d'amplitude, de phase et d'angle

Outre la courbure du rayon produite par des variations relativement importantes de la distribution verticale de l'indice de réfraction, des fluctuations rapides de l'amplitude, de la phase et de l'angle d'arrivée peuvent être causées par de petites variations irrégulières dudit indice. Leurs effets diminuent la précision des systèmes radioélectriques de poursuite, normalement construits en supposant l'absence de toute distorsion de phase du front de l'onde à la réception. Le déphasage affecte, de plus, la stabilité des fréquences transmises à travers l'atmosphère et il contribue à la diminution du gain observé sur les antennes de grandes dimensions.

En ce qui concerne les liaisons espace-espace ou Terre-espace réalisées avec de grands angles de site et des fréquences inférieures à environ 20 GHz, les petites variations de l'indice de réfraction n'ont généralement pas d'effet appréciable, mais à des fréquences plus élevées et dans certaines conditions météorologiques, cet effet peut être important. En supposant une source située hors de la troposphère et une antenne parabolique de réception d'un diamètre maximal de quelques mètres, les fluctuations crête-à-crête les plus importantes, prévisibles pour une atmosphère non troublée, ont une valeur respective d'environ ± 4 dB et de ± 2 dB, à 100 GHz et à 35 GHz, pour des angles de site dépassant 45°. Pour des angles de site d'environ 10°, les fluctuations peuvent cependant parfois atteindre une valeur respective de ± 12 dB et de ± 6 dB à 100 GHz et à 35 GHz.

On estime qu'à une distance de 6 m comptée perpendiculairement au front de l'onde (ce qui représente le diamètre d'une antenne de grandes dimensions utilisée en ondes millimétriques), la valeur efficace de la différence de phase causée par la troposphère sur une liaison Terre-espace peut parfois atteindre 40° et 15° pour des fréquences respectives de 100 GHz et de 35 GHz, lorsque l'angle de site dépasse 45°. Pour un angle de site d'environ 10°, cette différence de phase atteint environ 80° et 30° pour les mêmes fréquences.

L'évaluation des scintillations de phase et d'amplitude repose sur des calculs théoriques fondés sur des valeurs mesurées des fluctuations de l'indice de réfraction [Yokoi et autres, 1970; Lane, 1968]. Elle doit en conséquence être utilisée avec prudence, en attendant les résultats d'observations expérimentales plus directes, effectuées dans diverses conditions météorologiques.

Par ailleurs, on a effectué au Japon [Yokoi et autres, 1970] des études théoriques et expérimentales sur la scintillation troposphérique. Les études théoriques basées sur des mesures à 4 et 6 GHz indiquent que, entre 2 et 10 GHz, la scintillation est indépendante de la fréquence. La Fig. 1 illustre l'écart type des scintillations dans des conditions atmosphériques normales pour une source ponctuelle, en fonction de l'angle de site, le diamètre de l'ouverture de l'antenne étant pris comme paramètre.

Les valeurs efficaces prévisibles des fluctuations rapides de l'angle d'arrivée à environ 4 GHz et pour un angle de site d'environ 15° peuvent être comprises entre 2×10^{-5} et 5×10^{-5} radian.

Les mesures de variation d'amplitude faites à 7 GHz sur les trajets Terre-espace pour de petits angles de site [C.C.I.R., 1970-1974b] montrent que des évanouissements importants peuvent se produire aux angles de site inférieurs à 5° environ.

3. Affaiblissement dû aux précipitations et aux gaz atmosphériques

3.1 Généralités

L'affaiblissement par les gaz ou par les hydrométéores est en général exprimé en dB par unité de longueur, cette dernière étant presque toujours le km. Dans les liaisons sol-sol, de nombreuses caractéristiques de l'atmosphère peuvent être supposées constantes le long du trajet.

Au contraire, dans les liaisons Terre-espace, non seulement les caractéristiques de l'atmosphère varient le long du trajet, mais de plus la longueur du trajet soumis à l'affaiblissement dépend de l'angle qu'il fait avec l'horizontale.

3.2 Absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau

L'absorption gazeuse totale A_a (en dB) dans l'atmosphère, pour un trajet Terre-espace de longueur r_0 (en km) peut être donnée par :

$$A_a = \int_0^{r_0} \left\{ \gamma_o(r) + \gamma_w(r) \right\} dr \quad \text{dB}$$

où γ_o et γ_w représentent respectivement les coefficients d'absorption (en dB/km) de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Ceci peut être exprimé par :

$$A_a = \gamma_{o0} r_{eo} + \gamma_{w0} r_{ew} \quad \text{dB}$$

où γ_{o0} et γ_{w0} sont respectivement les coefficients d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau déterminés à la surface de la Terre et où r_{eo} et r_{ew} sont les longueurs équivalentes du trajet à travers l'atmosphère. La longueur équivalente pour l'absorption par l'oxygène r_{eo} est celle du trajet d'une onde radioélectrique à travers une atmosphère de densité constante s'étendant de la surface de la Terre à une altitude de 4 km environ et surmontée d'un espace vide. La longueur équivalente pour l'absorption par la vapeur d'eau r_{ew} est approximativement égale à la longueur correspondante à travers une atmosphère uniforme d'environ 2 km d'épaisseur.

La Fig. 2 représente l'affaiblissement théorique (dans un seul sens) aux fréquences comprises entre 1 et 160 GHz, calculé pour des trajets verticaux et initialement horizontaux à travers une atmosphère modérément humide, à stratification sphérique (7,5 g/m³ à la surface) [Crane, 1971]. On y a indiqué également les valeurs limites de l'affaiblissement correspondant à une humidité relative de 0 et de 100 % sur un trajet vertical traversant la même atmosphère. La Fig. 3 représente l'affaiblissement (dans un seul sens) sur des trajets verticaux entre les hauteurs indiquées et la limite supérieure de l'atmosphère, pour la même gamme de fréquences et dans une atmosphère modérément humide, comme dans la Fig. 2. La Fig. 4 donne l'affaiblissement vertical (dans un seul sens) pour la même atmosphère modérément humide, aux fréquences comprises entre 40 et 340 GHz.

3.3 Affaiblissement dû aux précipitations

3.3.1 Généralités

Les formules générales d'affaiblissement par les précipitations sont données dans le Rapport 233-3; la description des précipitations est contenue dans le Rapport 563.

Cependant, pour déterminer l'affaiblissement sur des trajets Terre-espace, il faut considérer d'autres facteurs pour tenir compte du fait que l'intensité de précipitation dans l'espace n'est pas uniforme et qu'elle varie en fonction de l'angle de site. La corrélation spatiale de l'intensité de précipitation diminue rapidement lorsque la distance augmente sur les trajets traversant de fortes précipitations. D'autre part, la distribution cumulative de l'affaiblissement varie en fonction de l'angle de site du trajet parce que la probabilité pour qu'une cellule intercepte un trajet dépend de la distance que celui-ci parcourt au-dessous de l'altitude maximale de la précipitation. Aux petits angles de site, la distribution cumulative dépend aussi de la probabilité pour que le trajet soit intercepté par plusieurs cellules de précipitation. Cependant, on n'a pas encore de renseignements suffisants sur l'étendue verticale des précipitations ni sur la corrélation spatiale de ces précipitations pour établir une loi applicable au monde entier.

Pour tenir compte du caractère non uniforme de l'intensité de précipitation dans l'espace sur des trajets obliques, on a utilisé une méthode empirique. Cette méthode définit une « distance équivalente » d'un trajet fictif le long duquel des précipitations ayant des caractéristiques uniformes provoqueraient le même affaiblissement que sur le trajet réel. La distance équivalente est déduite des distributions statistiques de l'affaiblissement le long d'un trajet oblique réel et de l'intensité de précipitation ponctuelle au sol au voisinage du trajet (relevé durant la même période), par application de la relation théorique entre l'affaiblissement spécifique et l'intensité de précipitation. Les premiers résultats obtenus sur la variation de la distance équivalente en fonction de l'angle de site, avec l'intensité de précipitation comme paramètre, ont été présentés également [C.C.I.R., 1970-1974 c, d et e]. A titre provisoire, les problèmes qui se posent sur les trajets Terre-espace peuvent donc être traités de la même façon que les problèmes sol-sol, auquel cas on se reportera au Rapport 233-3.

3.3.2 Méthodes de mesure et résultats expérimentaux

Pour mesurer l'affaiblissement sur les trajets Terre-espace, on a appliqué plusieurs méthodes. La méthode la plus directe consiste à utiliser des transmissions faites à partir de satellites, mais ces transmissions n'existent pas pour tous les emplacements, toutes les fréquences et tous les angles de site à considérer. On a effectué quelques mesures en utilisant des aéronefs, mais du point de vue statistique les résultats ont une valeur limitée. On a donc recouru largement aux techniques radiométriques pour mesurer l'affaiblissement sur les trajets Terre-espace, en considérant le Soleil comme source du rayonnement, ou pour estimer l'affaiblissement à partir de résultats de mesure de la température du bruit du ciel.

La radiométrie solaire permet de faire des mesures directes et suffisamment précises de l'affaiblissement qui se produit dans une large gamme dynamique. Cependant, les données ainsi obtenues sont d'une application limitée en raison du mouvement du Soleil, et aussi en raison du fait que les données statistiques ainsi recueillies risquent d'être faussées par des effets diurnes. Certaines indications [C.C.I.R., 1970-1974 f et g] donnent à penser qu'il existe dans certaines régions une tendance à de fortes précipitations et, par voie de conséquence, à l'apparition d'évanouissements profonds en fin d'après-midi, notamment durant les mois d'été, mais il faut continuer de recueillir des données expérimentales pour pouvoir évaluer un facteur de correction saisonnier ou horaire.

Les mesures de la température du bruit du ciel sont de portée plus limitée en ce qui concerne la dynamique à l'intérieur de laquelle les affaiblissements peuvent être estimés avec le degré d'exactitude voulu sur telle ou telle fréquence. En revanche, elles fournissent une méthode simple pour obtenir des statistiques de l'affaiblissement, quel que soit l'angle de site. Cependant, cette méthode ne permet pas de tenir compte convenablement des pertes provoquées par la diffusion, ce qui risque d'aboutir à une sous-estimation de l'affaiblissement. Il faudra donc appliquer avec prudence les données obtenues sur des fréquences pour lesquelles la diffusion contribue pour une large part à l'affaiblissement total [Zavody, 1974].

D'autres études ont été menées dans la région centrale de la partie européenne de l'U.R.S.S. [C.C.I.R., 1966-1969b]. Elles ont permis de calculer les affaiblissements prévisibles pour 0,1 % et 1 % du temps, avec différents angles de site et différentes fréquences allant de 5 à 20 GHz. Les valeurs de l'affaiblissement ont été fondées sur les résultats de mesures s'étendant sur une période de dix ans et portant sur l'intensité de la pluie à la surface du sol (valeur moyenne pour une minute), ses dimensions horizontales et verticales, l'étendue et l'épaisseur de la couche nuageuse. On a trouvé, par exemple, qu'à 10 GHz, on devait s'attendre à des affaiblissements respectifs de 3,5 dB et de 1,2 dB pendant 0,1 % et pendant 1 % du temps, l'angle de site étant de 10°. Les valeurs correspondantes dans la direction du zénith sont respectivement de 0,15 dB et de 0,1 dB. A 20 GHz, les affaiblissements prévisibles sont de 18 dB et de 5,5 dB pour des pourcentages respectifs de 0,1 % et de 1 % du temps, l'angle de site étant également de 10°.

Des données fournies par des radars météorologiques à Montréal ont également servi à estimer les distances séparant les stations terriennes. On a, dans ce cas, eu recours à la technique de la réception en diversité pour compenser les effets de fortes pluies localisées [Hogg, 1968]. On a observé que le diamètre des foyers orageux, où le taux équivalent des précipitations dépasse 25 mm/h, est presque indépendant de l'altitude et que la fréquence d'occurrence décroît jusqu'à des valeurs très basses pour des diamètres équivalents excédant 16 km. Ces conclusions négligent cependant l'importance de la corrélation spatiale de l'occurrence des cellules orageuses. C'est pour la même raison qu'il est difficile d'estimer les variations en fonction de l'angle de site des affaiblissements importants observés pendant de faibles pourcentages de temps.

3.4 *Dépolarisation due aux précipitations*

La dépolarisation due aux précipitations est traitée dans le Rapport 233-3. Cependant, il serait possible que les résultats soient différents pour des liaisons obliques. On a encore peu de mesures indiscutables à ce sujet [Taur, 1974]. On a essayé de simuler des liaisons obliques Terre-espace par des liaisons entre deux points d'altitude très différents au-dessus de la Terre [C.C.I.R., 1970-1974 h]. Il faut utiliser ces résultats avec prudence car la nature des vents dans une telle simulation est très différente de celle des vents en atmosphère libre, et de ce fait le spectre des décimètres et l'orientation des gouttes d'eau ne sont pas les mêmes dans les deux cas.

Par suite du mécanisme qui est à l'origine de cette dépolarisation, le résultat peut être différent suivant le type de polarisation émise. Pour des polarisations linéaires orthogonales (verticales et horizontales), par exemple, le découplage de polarisation est plus élevé que pour les autres types de polarisations [C.C.I.R., 1970-1974 h et j].

3.5 *Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard*

Pour les nuages et le brouillard constitués uniquement de petites gouttelettes d'eau ou de glace (diamètre généralement inférieur à 0,01 cm), la loi de Rayleigh donne une bonne approximation et l'on peut exprimer l'affaiblissement en fonction de la quantité totale d'eau par unité de volume [Ryde et Ryde, 1945]. Ainsi, l'absorption à l'intérieur de tels nuages ou brouillard peut être donnée par :

$$A_c = K_i M \quad \text{dB/km}$$

où A_c est le coefficient d'absorption dans le nuage, K_i un coefficient d'affaiblissement (en dB/km (g/m³)⁻¹) et M le contenu d'eau liquide du nuage (en grammes par mètre cube).

Les valeurs de K_i sont indiquées à la Fig. 5 [Snider, 1968] pour la gamme de fréquences 10 à 50 GHz et pour des températures variant de -8° C à +20° C.

Etant donné les propriétés diélectriques différentes de la glace et de l'eau, les nuages constitués de particules de glace causent des affaiblissements de deux ordres de grandeur moins importants que les nuages formés de gouttelettes d'eau et dont la teneur en eau est cependant la même [Ryde et Ryde, 1945].

4. *Diffusion par les précipitations*

4.1 *Généralités*

Par des méthodes théoriques et expérimentales, on a montré que la diffusion produite par les précipitations peut créer un couplage entre les signaux émis par deux antennes situées au sol à condition que les lobes de rayonnement de ces deux antennes interceptent un volume commun de l'espace et que les précipitations existent au moins dans ce volume commun [Doherty et Stone, 1960; Crane, 1974]. Ce phénomène de diffusion n'est évidemment pas permanent mais il peut jouer un rôle important dans le brouillage produit entre stations terriennes et de Terre. On en trouvera une application numérique dans le Rapport 569, les renseignements relatifs aux précipitations sont contenus dans le Rapport 563.

Le volume de diffusion dépend à la fois de la largeur et de la hauteur de la cellule de précipitation. Du fait que des particules d'eau gelée causent une diffusion, mais une absorption négligeable seulement, la hauteur de cellule à considérer pour l'affaiblissement par diffusion diffère de l'altitude maximale de précipitation à considérer pour l'affaiblissement par absorption. On suppose que la hauteur de la cellule est une variable aléatoire, fonction du climat. Faute d'information meilleure, on a adopté les valeurs indiquées au Tableau I pour les divers climats. Pour la même raison, on a supposé que les hauteurs de cellule sont les mêmes pour des pourcentages du temps compris entre 0,1 et 0,001. Enfin, pour faire les calculs ou pour établir la similitude climatologique, on a supposé que la section transversale de diffusion par unité de volume est indépendante de la hauteur à l'intérieur de la cellule, ce qui correspond au cas le plus simple. Les hypothèses plus complexes qu'on pourrait faire sur l'influence de la hauteur ne sont pas justifiées par l'état actuel des connaissances.

TABLEAU I

Catégorie des climats	Hauteur des sommets des précipitations liquides dans les cellules (km)
1	15
2	11
3	7
4	7
5	7

4.2 Comparaison des calculs et des mesures

Les pertes de transmission causées par la diffusion due aux précipitations peuvent être calculées approximativement à l'aide des équations bistatiques pour les radars [Crane, 1974].

Celles-ci se présentent sous des formes nombreuses, dont les plus importantes, eu égard à la diffusion bistatique, sont la pluie, la neige, la neige fondante et la grêle. Les caractéristiques de la diffusion par la pluie et la neige sont représentées de façon satisfaisante par la théorie de la diffusion de Rayleigh; il n'en est pas ainsi pour la diffusion due à la grêle ou à la neige fondante. De mesures 4 GHz [Crane, 1974], il ressort que les résultats des calculs faits au moyen de la relation s'accordent généralement avec les résultats de mesures de la réflectivité par radar Z^* faites simultanément par radiodétection à 1,3 GHz, à $\pm 2,7$ dB près, maximum absolu admissible de l'erreur résultante des mesures effectuées sur les deux systèmes. Ces mesures portaient sur la diffusion due à la neige, la neige fondante et la pluie. Des mesures sur la diffusion due à la neige fondante ont montré que l'affaiblissement de transmission est généralement inférieur de 10 dB pour une diffusion très voisine de la diffusion vers l'avant. Il est vraisemblable qu'on obtiendrait un résultat analogue pour une diffusion causée par la grêle.

Dans une précipitation continue, il peut y avoir de la neige fondante, de même que dans la pluie légère qui entoure les cellules de pluie intense, celles qui contribuent le plus à la diffusion du signal. D'après la définition de la largeur de la cellule de précipitation, D , la pluie légère n'est pas prise en ligne de compte. C'est là une approximation utile quand on considère seulement les champs de grande intensité qui se produisent pendant les petits pourcentages de temps intervenant dans le calcul de la probabilité de brouillage ou de la distance de coordination. Comme on ne tient pas compte des faibles pluies, les effets des écarts aux approximations faites ci-dessus et que l'on peut constater dans la couche de neige en fusion, sont sans importance. Dans le cas de la grêle, l'effet de cet écart n'a d'importance que pour des pourcentages de temps extrêmement petits (0,001 %), puisque la grêle tombe assez rarement en un point donné de l'espace. Pour les applications les plus intéressantes qui mettent en jeu un pourcentage de temps de 0,01 %, les relations ci-dessus sont satisfaisantes.

Les données expérimentales dont on dispose actuellement indiquent qu'une analyse basée sur la théorie de la diffusion de Rayleigh et sur les équations bistatiques des radars [Crane, 1974] permet de prédire les pertes de transmission causées par la diffusion due aux précipitations avec une erreur plus faible qu'environ 2 dB par rapport aux valeurs mesurées, pour les fréquences inférieures à 8 GHz environ. La précision est encore meilleure si l'on tient compte des effets de variation de la forme des gouttes par rapport à la théorie de Rayleigh. Les effets de l'affaiblissement ne sont pas importants dans les problèmes de brouillage aux fréquences inférieures à 8 GHz.

Une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour les fréquences 12 GHz et 18 GHz indique une bonne précision pour un pourcentage de temps de 0,01 %; les pertes de transmission étant plus faibles à 12 GHz qu'à 18 GHz. Pour d'autres pourcentages de temps la précision est moins bonne; on considère que cela est dû à des hypothèses erronées sur les dimensions des cellules.

On trouvera des données plus détaillées à ce sujet dans le Rapport 569.

* Z est défini comme la somme des diamètres, élevés à la puissance six, des particules précipitées dans l'unité de volume (mm^6/m^3).

5. Température de bruit du ciel due à l'absorption par les gaz atmosphériques et les précipitations

5.1 Généralités

La région non ionisée de l'atmosphère, considérée du point de vue de l'absorption, est également une source d'émission de bruits. La température équivalente de bruit du ciel T_s , dans une direction donnée, est obtenue au moyen de l'expression suivante:

$$T_s = \int_0^\infty T(r) \alpha(r) \exp \left\{ - \int_0^r \alpha(r') dr' \right\} dr$$

où $T(r)$ (en K) et $\alpha(r)$ (en km^{-1}) sont respectivement les coefficients de température d'absorption du milieu en fonction de la position r le long du trajet du rayon. Si l'on peut remplacer la température $T(r)$ par une température moyenne de rayonnement T_m , l'expression précédente se simplifie comme suit:

$$T_s = T_m \left(1 - \frac{1}{L} \right)$$

L étant le facteur d'affaiblissement du milieu absorbant, exprimé sous forme d'une fraction.

De plus, dans le cas d'une atmosphère horizontalement stratifiée, la température de bruit du ciel pour l'angle zénithal Φ est donnée par l'expression:

$$T_s(\Phi) = T_m (1 - \beta_0^{\sec \Phi})$$

lorsque l'angle zénithal est inférieur à 85° , $\beta_0 = \frac{1}{L_0}$ étant le coefficient de transmission de l'atmosphère dans la direction du zénith.

En estimant la température de bruit des antennes, le diagramme de rayonnement de l'antenne et la radiation en provenance de la surface de la Terre doivent aussi être pris en considération.

5.2 Température de bruit du ciel due aux gaz atmosphériques

La Fig. 6 indique la température globale de bruit du ciel pour divers angles de site et pour des fréquences comprises entre 1 et 100 GHz.

On trouvera dans un article publié [Snider, 1968] des considérations plus détaillées sur les bruits d'origine naturelle se produisant dans la gamme 1 à 10 GHz. Les valeurs de la température de bruit du ciel citées dans cet article sont un peu plus faibles que celles qu'indique la Fig. 6 pour les fréquences inférieures à 10 GHz, ceci en raison de l'emploi de valeurs plus récentes des constantes des largeurs de raies.

5.3 Température de bruit du ciel due à la pluie et aux nuages

Le bruit dû à l'absorption par la pluie et les nuages peut être calculé en appliquant les expressions indiquées ci-dessus, à condition de connaître la température et le taux d'affaiblissement, ainsi que leurs variations le long du trajet étudié.

Les travaux effectués en U.R.S.S. [C.C.I.R., 1966-1969b] et précédemment mentionnés indiquent que, pour un angle de site de 10° et pendant 1 % du temps, la contribution prévisible de la pluie et des nuages à la température de bruit de l'antenne est de 40 K à 10 GHz et d'environ 140 K à 20 GHz. Pour 0,1 % du temps, les valeurs correspondantes sont respectivement les suivantes: 90 K et 260 K.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, W.L., BEYERS, N.J. et RAINEY, R.J. [1960] Comparison of experimental and computed refraction. *IRE Trans.*, AP-8, 456-461.
- ANWAY, A.C. [juin 1961] Empirical determination of total atmospheric refraction at centimeter wavelengths by radiometric means. Collins Research Report No. CRR-2425, Collins Radio Company, Cedar Rapids, Iowa.
- BEAN, B.R. et DUTTON, E.J. [1966] Radio meteorology. NBS Monograph No. 92, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.

- BEAN, B.R. et THAYER, G.D. [1963] Comparison of observed atmospheric radio refraction effects with values predicted through the use of surface weather observations. *NBS Journal of Research*, **67D**, 3.
- BEAN, B.R., THAYER, G.D. et CAHOON, B.A. [1960] Methods of predicting the atmospheric bending of radio rays. *NBS Journal of Research*, **64D**, 5.
- C.C.I.R. [1966-1969a] Doc. V/27, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1966-1969b] Doc. IV/332, U.R.S.S.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/198, Inde.
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/72, Canada.
- C.C.I.R. [1970-1974c] Doc. 5/40, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974d] Doc. 5/154, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974e] Doc. 5/164, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974f] Doc. 5/146, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974g] Doc. 5/179, France.
- C.C.I.R. [1970-1974h] Doc. 5/194, Suisse.
- C.C.I.R. [1970-1974j] Doc. 5/196, ESRO.
- CRANE, R.K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimetre and millimetre wavelength bands. *Proc. IEEE*, **59**, 173-188.
- CRANE, R.K. [1974] Bistatic scatter from rain. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-22, 312.
- DOHERTY, L. H. et STONE, S. A. [1960] Forward scatter from rain. *IRE Trans. Ant. Prop.*, AP-8, 414-418.
- FANNIN, B. M. et JEHN, K. H. [1957] A study of radar elevation-angle errors due to atmospheric refraction. *IRE Trans.*, AP-5, 71.
- HOGG, D. C. [janvier 1968] Millimetre-wave communication through the atmosphere. *Science*, Vol. 159, 39-45.
- LANE, J.A. [1968] Scintillation and absorption fading on line-of-sight links at 35 and 100 GHz. *I.E.E. Conference Publication No. 48*, Tropospheric Wave Propagation, Londres.
- MISME, P., BEAN, B.R. et THAYER, G.D. [août 1960] Models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, **48**, 8, 1499-1501.
- NORTON, K.A., HERBSTREIT, J.W., JONES, H.B., HORNBERG, K.O., PETERSON, C.F., BARGHAUSEN, A.F., JOHNSON, W.E., WELLS, P.I., THOMPSON, M.C., Jr., VETTER, M.J. et KIRKPATRICK, A.W. [novembre 1961] An experimental study of phase variations in line-of-sight microwave transmissions. NBS Monograph No. 33.
- RYDE, J.W. et RYDE, D. [1945] Attenuation of centimetre waves by rain, hail, fog and clouds. General Electric Co., Wembley, Angleterre.
- SCHULKIN, M. [mai 1952] Average radio ray refraction in the lower atmosphere. *Proc. IRE*, Vol. 40, **5**, 554-561.
- SNIDER, J.B. [janvier 1968] A proposed program for the study of atmospheric attenuation of satellite signals. ESSA Technical Report RL 62-WPL 1.
- TAUR, R. [1974] Rain depolarization: theory and experiment. COMSAT Tech. Rév.
- YOKOI, H., YAMADA, M. et SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. *Astronomical Society*, Japon, Vol. 22, **4**, 511-524.
- ZAVODY, A.M. [1974] Effect of scattering by rain on radiometer measurements at millimetre wavelengths. *Proc. I.E.E.*, Vol. 121, 257-263.

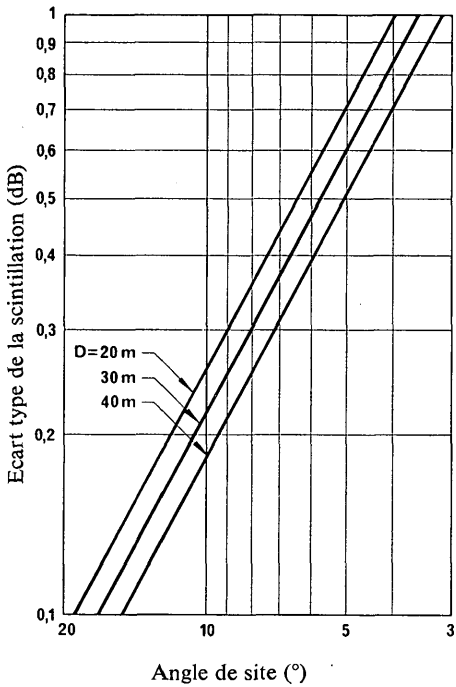


FIGURE 1

Ecart type de la scintillation d'amplitude
D: Diamètre de l'antenne

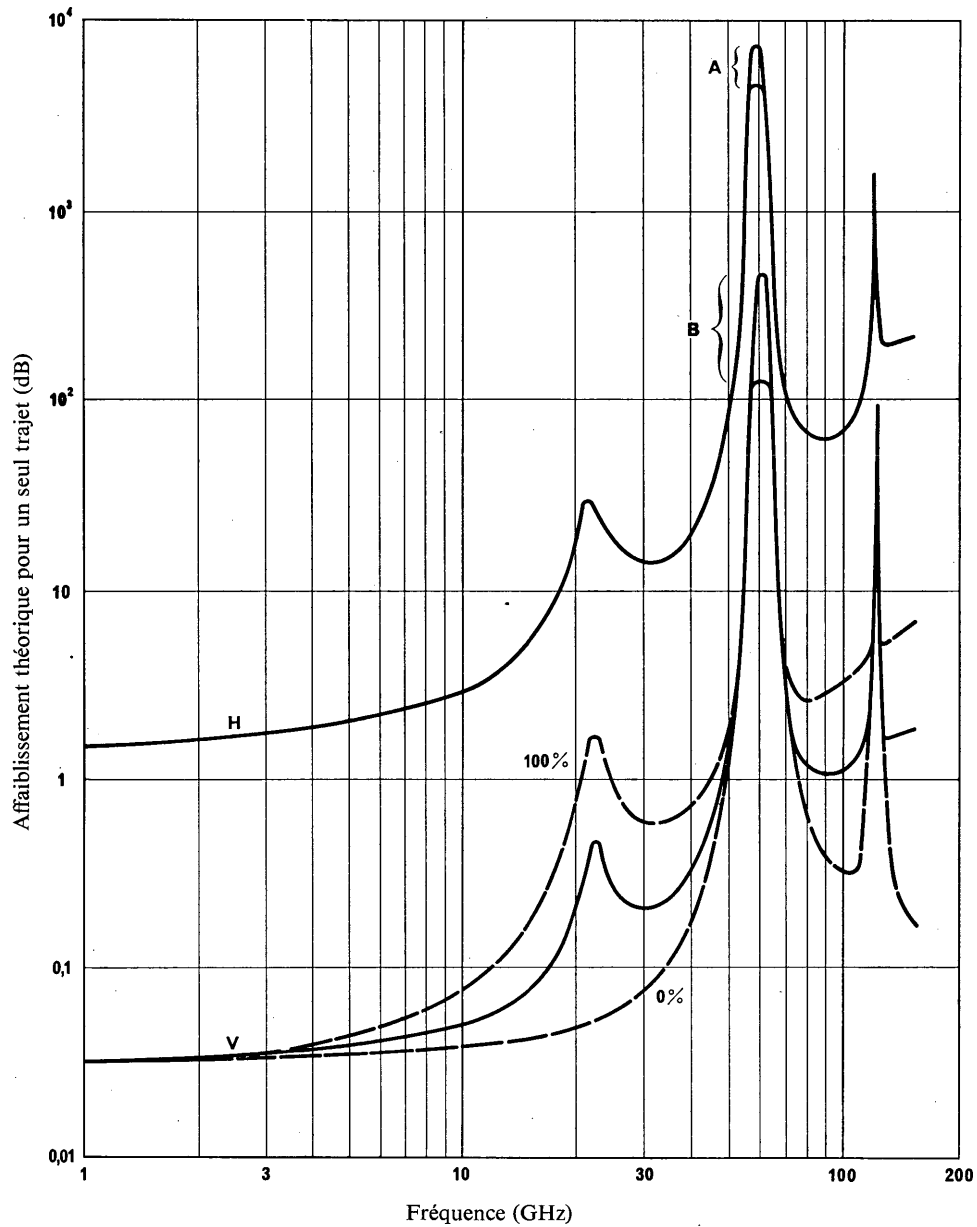


FIGURE 2

Affaiblissement théorique pour un trajet simple horizontal ou vertical à travers l'atmosphère (calculé en utilisant l'atmosphère standard des Etats-Unis d'Amérique pour le mois de juillet à 45° de latitude nord). Les courbes en trait plein s'appliquent à une atmosphère modérément humide (7,5 g/m³ à la surface du sol). Les courbes en tirets s'appliquent à l'affaiblissement vertical pour les limites de 0 et 100 % d'humidité relative

A: Gamme des valeurs H: Horizontal
B: Gamme des valeurs V: Vertical

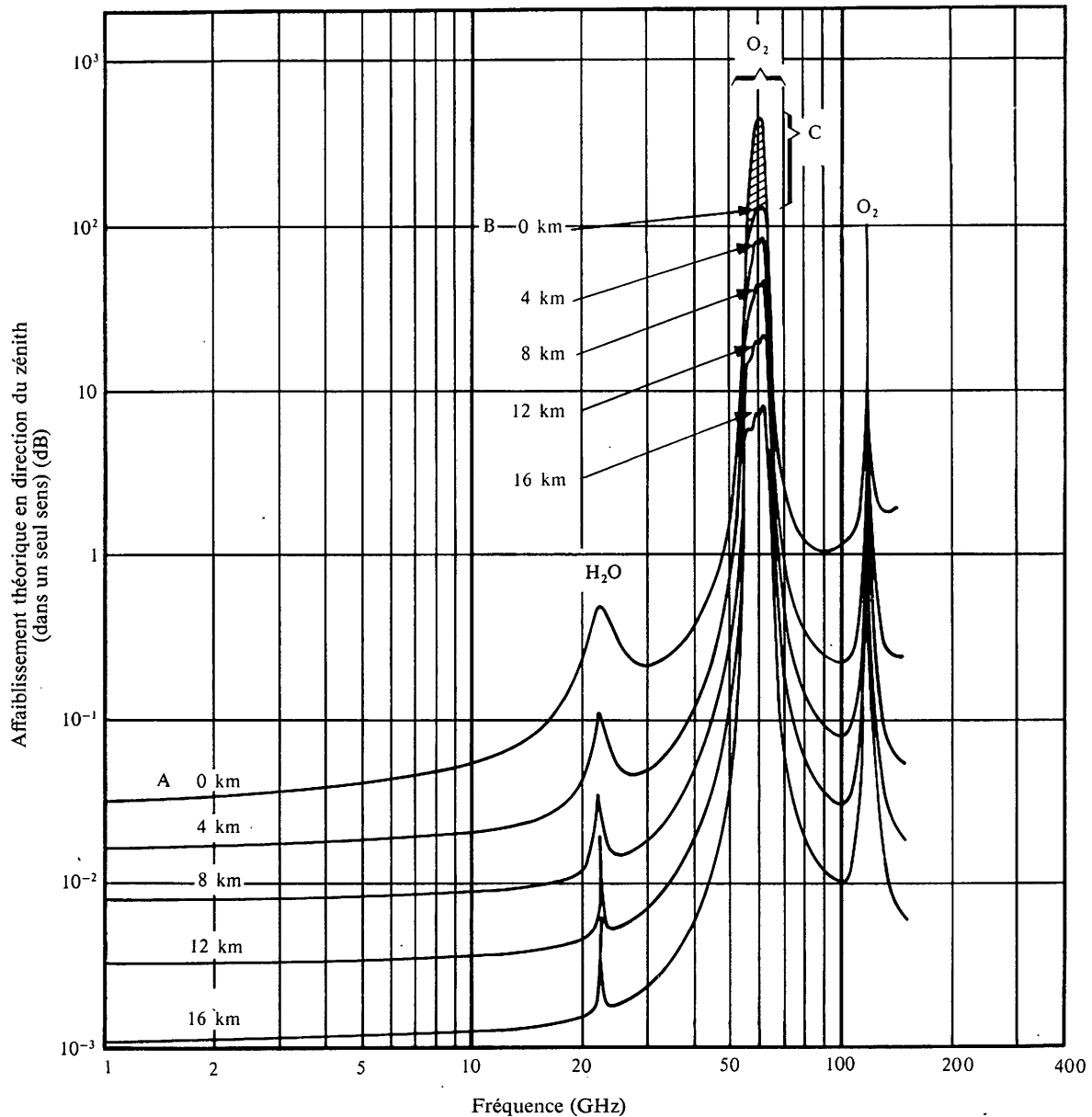


FIGURE 3

Affaiblissement théorique vertical, dans un seul sens, à partir des altitudes indiquées, jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère, pour une atmosphère modérément humide (7,5 g/m³ à la surface)

A: Altitudes de départ (km)

B: Valeurs minimales pour des trajets à partir de l'altitude indiquée

C: Domaine de variation pour des trajets partant du sol jusqu'à 80 km

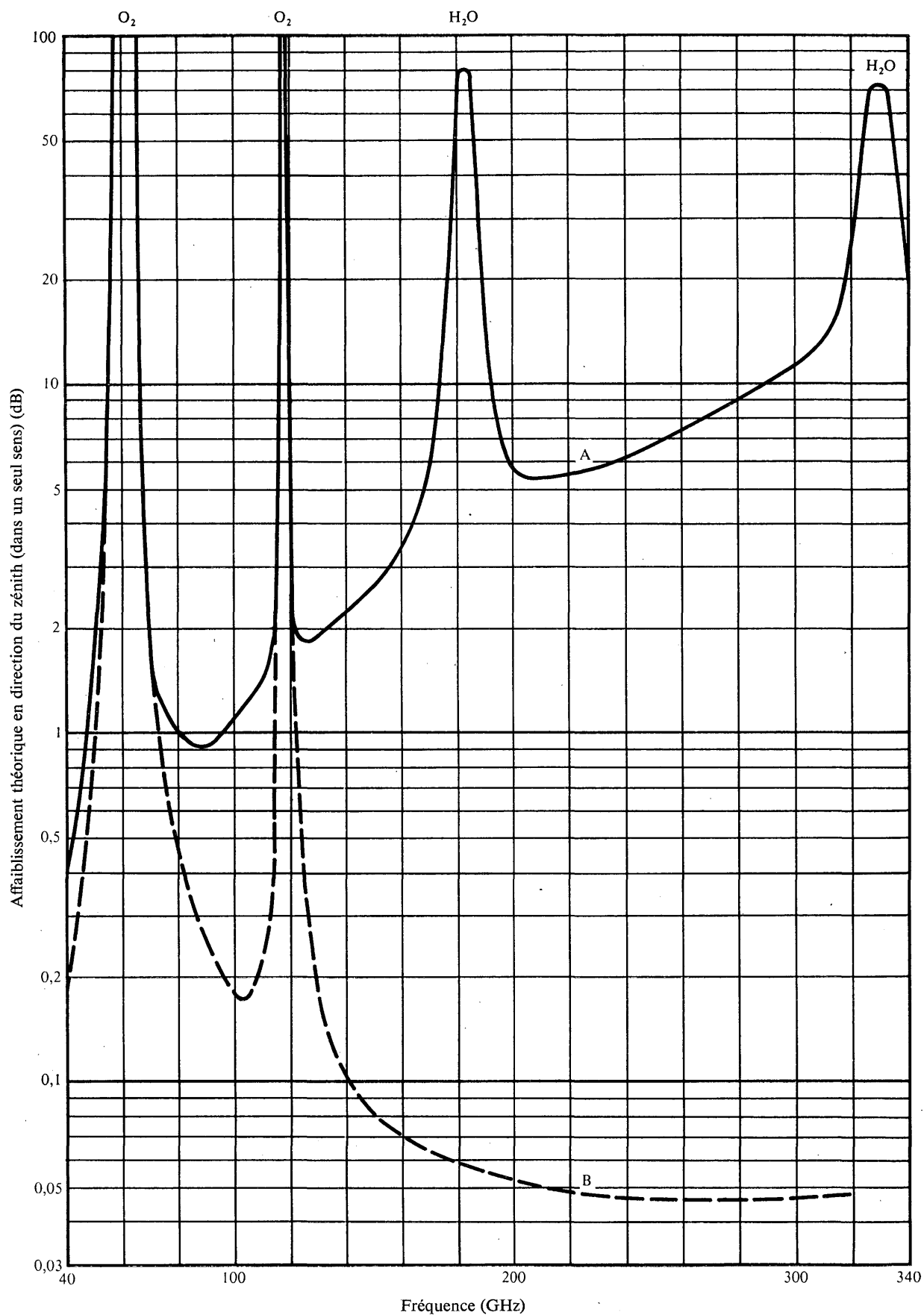


FIGURE 4

Affaiblissement en direction du zénith dans une atmosphère claire

A: Atmosphère moyenne, avec teneur en vapeur d'eau de 7,5 g/m³ à la surface de la Terre

B: Atmosphère sèche

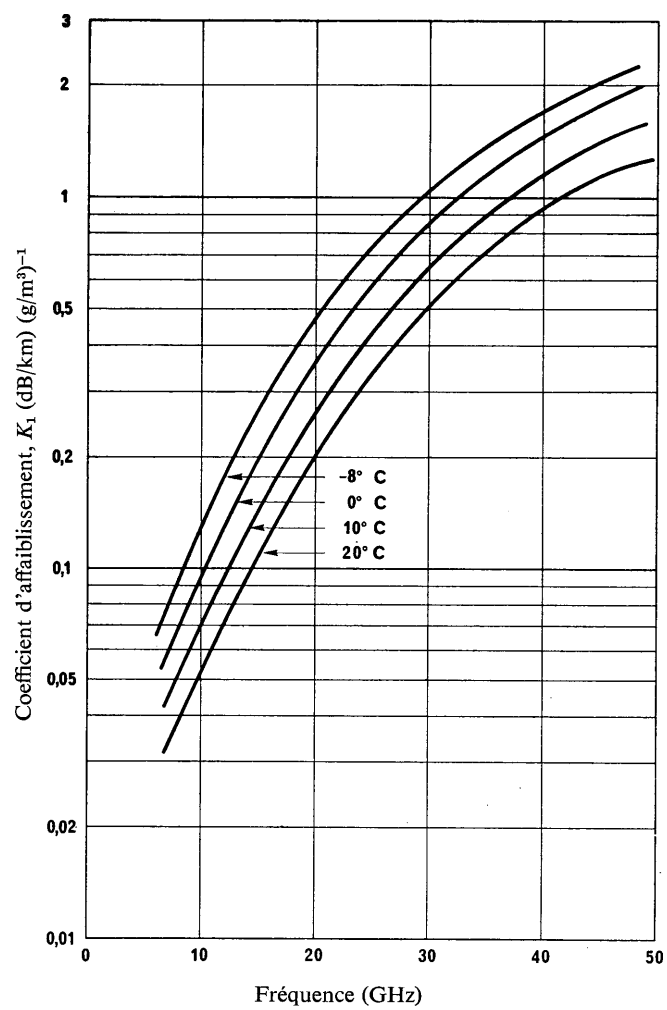


FIGURE 5

*Affaiblissement par les nuages d'eau liquide
à diverses températures en fonction de la fréquence*

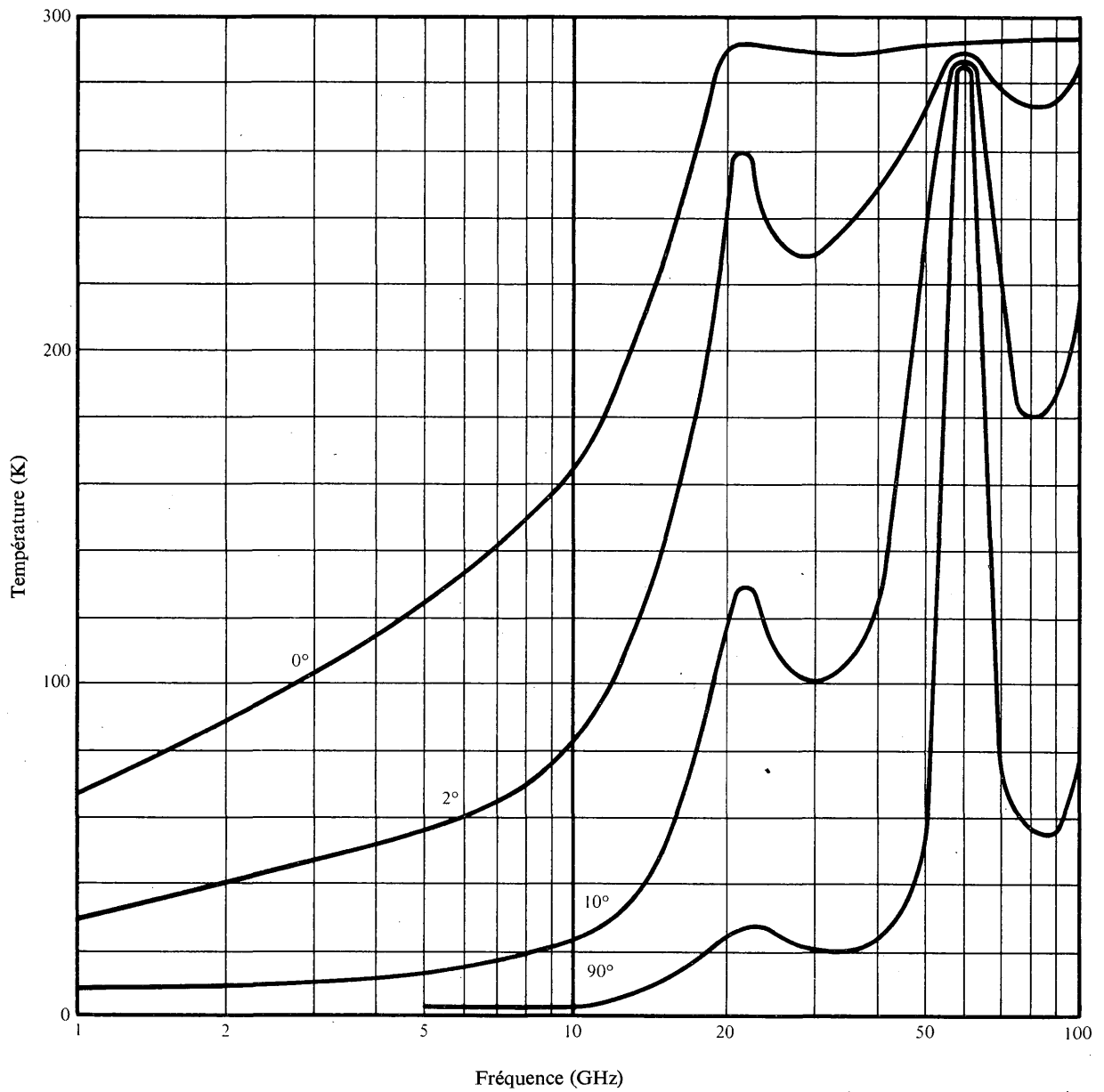


FIGURE 6

Température totale du bruit dans le ciel

Pression à la surface: 760 mg Hg Température de la surface: 20° C

Densité de la vapeur d'eau: 10 g/m³

Angles de site: 0° à 90°

EFFETS DE LA RÉFRACTION TROPOSPHÉRIQUE SUR LES FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 10 MHz

(Question 3-1/5)

(1956 – 1963 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Les courbes de propagation de l'onde de sol représentées dans l'Avis 368-2 ne tiennent pas compte de la réfraction troposphérique ainsi qu'il est expliqué dans l'Annexe à cet Avis; en revanche, dans l'Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences supérieures à 30 MHz [C.C.I.R., 1955 et 1959], le C.C.I.R. a tenu compte des effets de la décroissance linéaire de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur, en utilisant un rayon terrestre équivalent égal aux $4/3$ du rayon réel. Même pour ces fréquences plus élevées, il importe de se rappeler que l'indice de réfraction de la troposphère ne décroît pas linéairement avec la hauteur et qu'il tend finalement vers l'unité dans l'espace libre. En ce qui concerne le taux de variation de l'affaiblissement en fonction de la distance, on a donc le droit d'admettre un rayon terrestre équivalent égal aux $4/3$ du rayon réel, mais, pour de plus grandes hauteurs, les courbes surestiment la valeur de champ; le deuxième Atlas contient des directives qui permettent de calculer le facteur de correction pour une courbe donnée de l'indice de réfraction, notamment dans le cas d'une loi exponentielle comme celle qui est postulée dans l'Avis 369-1 pour l'atmosphère de référence.

Sur les fréquences inférieures à 10 MHz, l'effet de la hauteur sur le gain diminue pour des valeurs moyennes de la hauteur et c'est en partie pour cette raison que les courbes de propagation de l'onde de sol s'appliquent uniquement au cas où les deux points extrêmes sont situés au niveau du sol. Par ailleurs, au-dessous de 3 MHz environ, la gamme des hauteurs qui entrent en ligne de compte pour déterminer le taux de variation de l'affaiblissement du champ en fonction de la distance à la surface de la Terre s'étend maintenant jusqu'à la région où l'indice de réfraction de la troposphère commence à s'écarter sensiblement de la valeur qui correspond à une diminution linéaire avec la hauteur et qui est justiciable de l'utilisation d'un rayon égal aux $4/3$ du rayon terrestre. Il en résulte que le taux de variation de l'affaiblissement du champ en fonction de la distance à la surface de la Terre ne justifie plus l'emploi d'une atmosphère dans laquelle l'indice de réfraction diminue linéairement jusqu'à des hauteurs illimitées.

A la limite supérieure de 10 MHz, pour les courbes de propagation de l'onde de sol représentées dans l'Avis 368-2, on a encore le droit pratiquement d'utiliser un rayon équivalent égal aux $4/3$ du rayon réel pour les deux points extrêmes situés au niveau du sol; en revanche, la troposphère peut avoir un effet extrêmement faible à la limite inférieure de 10 kHz, où la gamme des hauteurs qui entrent en ligne de compte pour la détermination du taux d'affaiblissement du champ en fonction de la distance s'étend à plusieurs kilomètres au-dessus de la Terre.

Entre l'utilisation d'un rayon équivalent égal aux $4/3$ du rayon terrestre pour 10 MHz et l'utilisation du rayon réel à 10 kHz, il y a donc une transition qui devient marquée vers 3 MHz et qui prend pratiquement fin à 10 kHz. Il y a longtemps déjà que l'on a reconnu la présence de cette transition comme le montre l'existence de la Question 3-1/5.

2. Méthodes théoriques et expérimentales

Les progrès réalisés dans cette étude ont été lents, cela pour deux raisons: d'une part, en raison de la difficulté d'analyser mathématiquement le problème dans le cas où l'opération aux valeurs propres contient une loi de variation de l'indice de réfraction telle que la loi exponentielle proposée, d'autre part, en raison du fait que, lorsque la fréquence décroît, l'influence de l'ionosphère devient prédominante dans la propagation à grande distance, ainsi qu'il est indiqué au § 6 de l'Annexe à l'Avis 368-2.

* Adopté à l'unanimité.

On a émis l'hypothèse qu'il est possible d'étudier expérimentalement les modifications apportées par la réfraction troposphérique à la propagation de l'onde de sol sur les fréquences inférieures à 10 MHz. Les résultats obtenus de cette manière sont en général peu concluants. Il est difficile d'acquérir la certitude que, sur un trajet terrestre, les effets observés sont dus à la troposphère et non à des irrégularités des constantes du sol ou que la valeur de la conductivité est effectivement supérieure à la valeur admise lorsque l'on compare les courbes avec les résultats de mesure.

Même sur un trajet maritime, pour lequel la conductivité est bien définie, l'ionosphère est susceptible d'avoir une influence appréciable à midi, sur des distances pour lesquelles on peut admettre que la troposphère provoque une augmentation sensible du niveau des signaux; il est vrai, cependant, que l'on a parfois constaté une réfraction troposphérique sensible sur des fréquences pouvant descendre jusqu'à 1500 kHz et à des distances au moins égales à 200 km (Doc. 176 (France), Varsovie, 1956).

On est arrivé à la conclusion qu'il n'est guère possible d'améliorer notablement les courbes d'après les résultats de ces expériences. Il est apparu, d'autre part, que toute cette question a un caractère quelque peu théorique, étant donné que l'on se sert très peu de ces courbes de propagation de l'onde de sol lorsqu'il faut tenir compte des effets ionosphériques, ainsi qu'il est indiqué au § 6 de l'Annexe à l'Avis 368-2.

3. Utilisation des techniques de transmission par impulsions

Cependant, étant donné les progrès accomplis dans les gammes d'ondes kilométriques au point de vue de l'utilisation des techniques de transmission par impulsions et des grandes puissances rayonnées, avec comme conséquence la mise en service de nouveaux auxiliaires de la navigation, on a été amené à reconsidérer l'ensemble de la question. La possibilité, envisagée au § 6 de l'Annexe à l'Avis 368-2 d'isoler l'onde de sol a pris une importance considérable et c'est la raison pour laquelle l'utilisation de techniques de transmission par impulsions occupe maintenant une place importante dans la Question 3-1/5.

Il apparaît maintenant que de nouvelles expériences de transmission d'impulsions contribueraient, tout au moins dans le cas de trajets maritimes de grande longueur, à élucider les propriétés de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz. Il convient de signaler que, lorsque l'on compare les valeurs expérimentales aux valeurs indiquées par les courbes, la caractéristique importante n'est pas la valeur absolue du champ à une distance donnée, laquelle dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la puissance rayonnée estimée, mais la loi de l'affaiblissement en fonction de la distance.

A des distances suffisamment grandes, pour lesquelles le premier terme de la série résiduelle contenue dans la formule de la diffraction est prédominant, le champ diminue en fonction de la distance selon une loi exponentielle, l'affaiblissement pouvant alors être exprimé en dB/km. C'est le taux de variation de l'affaiblissement qui est donné par la solution de l'équation aux valeurs propres dans l'étude mathématique du problème, et c'est ce taux qui fournit la mesure la plus simple des effets de la réfraction troposphérique sur la propagation de l'onde de sol. Le calcul des valeurs absolues du champ a résolu l'équation fondamentale aux valeurs propres.

4. Analyse mathématique

L'analyse mathématique porte essentiellement sur l'étude de la fonction hauteur-gain à partir de laquelle on déduit l'équation aux valeurs propres. Au § 3 de l'annexe à l'Avis 368-2, on a mis l'accent sur l'importance des effets de la hauteur sur la valeur du gain dans le cas d'aéronefs volant à haute altitude et utilisant des aides à la navigation dont le fonctionnement dépend de la propagation de l'onde de sol et qui mettent en œuvre des méthodes de transmission par impulsions. Toutefois, la correction des courbes, pour tenir compte de la fonction hauteur-gain, représenterait un travail extrêmement lourd. Il faudrait alors publier un atlas beaucoup plus volumineux que les atlas actuels [C.C.I.R., 1955 et 1959] et cela a été une raison suffisante pour ne pas tenir compte, dans le passé, de la fonction hauteur-gain.

Des méthodes de calcul permettant de trouver la solution générale de l'équation aux valeurs propres ont été mises au point, même pour des lois de variation de l'indice de réfraction définies d'après des données expérimentales [Bremmer, 1960 et 1962; Norton, 1959; Millington, 1958; Wait, 1959; Gerks, 1971; Rotheram, 1970] et l'on peut entreprendre maintenant d'établir des courbes de propagation,

compte tenu de la fonction hauteur-gain, en utilisant des méthodes de calcul modernes. On sait d'après ces travaux que, comme on s'y attendait, la troposphère exerce peu d'effet sur la propagation de l'onde de sol à 10 kHz, mais qu'à 1500 kHz il continue d'y avoir une nette modification sous forme d'une augmentation du rayon de la Terre.

5. Conclusions

L'une des tâches confiées au Groupe de travail intérimaire 5/1 créé aux termes de la Décision 3 est de proposer des amendements à l'Avis 368-2. Ce travail consistera, entre autres, à corriger les courbes pour tenir compte de l'effet de la troposphère en appliquant les méthodes mathématiques disponibles actuellement et à décider dans quelle mesure il est souhaitable ou possible d'indiquer la fonction hauteur-gain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BREMMER, H. [1960 et 1962] On the theory of wave propagation through a concentrically stratified troposphere with a smooth profile. Part I: Discussion of the extended W.K.B. approximation. *NBS Journ. of Research*, **64D**, 467 (1960). Part II: Expansion of the rigorous solution. *Ibid.*, **66D**, 31 (1962).
- C.C.I.R. [1955] *Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 Mc/s et 300 Mc/s* (U.I.T., Genève).
- C.C.I.R. [1959] *Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 Mc/s et 10 000 Mc/s* (U.I.T., Genève).
- GERKS, I.H. [juillet 1971] Computing the effects of tropospheric refraction at frequencies below 10 MHz. *Radio Science*, Vol. 6, 681-687.
- MILLINGTON, G. [1958] Propagation at great heights in the atmosphere. *Marconi Review*, **21**, 143.
- NORTON, K.A. [1959] System loss in radio-wave propagation. *NBS Journ. of Research*, **63D**, 53.
- ROTHERAM, S. [1970] Ground-wave propagation at medium and low frequencies. *Electronics Letters*, Vol. 6, **25**, 794-795.
- WAIT, J.R. [1959] On the propagation of radio waves in an inhomogeneous atmosphere. NBS Technical Note No. 24.

RAPPORT 563 *

DONNÉES RADIOMÉTÉOROLOGIQUES

(Question 2-2/5)

(1974)

1. Introduction

Certains calculs de propagation ne peuvent être faits que grâce à la connaissance de données radiométéorologiques. On expose quelques-unes de ces données dans le présent Rapport. Elles y sont présentées *a)* sous forme de cartes mondiales de l'indice de réfraction radioélectrique de l'atmosphère à la surface de la Terre, de sa variation sur le premier kilomètre et de son gradient au voisinage de la surface; *b)* sous forme de modèles de variation de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur; *c)* sous forme de statistiques des précipitations pluvieuses.

On étudiera ci-dessous la quantité N définie par $N = (n - 1) \cdot 10^6$, où n est l'indice de réfraction de l'air. N sera considérée ici en valeur moyenne mensuelle.

* Adopté à l'unanimité.

2. Cartes mondiales de l'indice de réfraction

2.1 Cartes de N_s

Afin de ne pas confondre les variations de N dues à l'altitude h d'un observatoire donné et celles dues à la climatologie, il est intéressant de calculer la valeur qu'aurait N réduite au niveau de la mer. Dans ce cas, on peut donc corriger chaque valeur de N mesurée à la surface du sol (N_s) d'un facteur supérieur à 1 afin d'obtenir la valeur de N_0 atteinte par N au niveau de la mer.

Ce procédé permettrait de pallier la difficulté que présente l'établissement de cartes de N_s ; puisqu'on ne peut pas obtenir une valeur « correcte » de N_0 , on peut, dans une certaine mesure, faire un choix arbitraire de la méthode à utiliser. Toutefois, pour que N_0 soit parfaitement représentatif de l'atmosphère en un lieu donné, il faut et il suffit que la loi exponentielle $N(h)$ soit applicable. On utilise pour calculer N_0 une fonction exponentielle unique avec une constante fixe. (Voir formule 2.)

On a étudié également la moyenne mensuelle de $N(h)$. Des considérations d'ordre théorique et expérimental conduisent à penser que $N(h)$ est systématiquement exponentiel dans les régions à latitude élevée. Toutefois, la non-homogénéité des données obtenues dans les régions intertropicales conduit à douter qu'une fonction exponentielle ou toute autre fonction élémentaire soit applicable dans ces régions [Misme et autres, 1960].

Les Fig. 1 et 2 montrent les courbes d'égale valeur moyenne de N_0 pour février et août et la Fig. 3 montre les zones où l'on a $N_0 > 350$ en valeur moyenne annuelle.

Note. — Etant donné l'échelle des cartes, le nombre de points de mesure et les méthodes de calcul, le degré d'incertitude sur les valeurs de N_s qui peuvent être obtenues est de l'ordre de quelques unités N dans les régions tempérées et d'une dizaine d'unités N dans les régions intertropicales.

Certaines administrations nationales ont fait pour leur territoire des analyses plus fines [C.C.I.R., 1970–1974a]. De plus, l'Administration des Etats-Unis d'Amérique a établi un grand nombre de cartes et de graphiques se rapportant au monde entier pour certains mois choisis [Bean et autres, 1960].

2.2 Cartes de ΔN

Pour cette grandeur, l'altitude de la station d'observation semble avoir assez peu d'importance, à condition toutefois que le relief ne soit pas trop irrégulier. On a donc calculé ΔN par la formule:

$$\Delta N = N_s - N_1$$

dans laquelle N_1 est la valeur de N à 1 km au-dessus du sol. Grâce à l'établissement d'un grand nombre de nouvelles stations dans les régions où leur densité était très faible précédemment (notamment pendant et depuis l'Année géophysique internationale), on peut désormais préparer des cartes mondiales de ΔN .

Des valeurs moyennes de données météorologiques à grande altitude sont publiées mensuellement dans un périodique patronné par l'O.M.M. et intitulé « Données climatiques mensuelles mondiales ». On a sélectionné les données relevées pendant cinq ans par 269 stations situées dans le monde entier, et l'on a calculé les valeurs moyennes mensuelles de ΔN de ces données en interpolant les données correspondant à 850 mb et celles relevées au sol (dans certains cas on a dû utiliser les données correspondant à 700 mb et, pour les stations des Etats-Unis d'Amérique, on disposait, dans bien des cas, des données correspondant au niveau de 900 mb). On a calculé ensuite les valeurs moyennes sur cinq ans, pour chacun des 12 mois; les cartes établies à partir de ces données sont reproduites sur les Fig. 4 à 7. La plupart des valeurs reportées sur ces cartes ont été obtenues par des observations faites à 0000 TU (dans certains cas, on a établi les moyennes de deux observations par jour, ou plus).

2.3 Données sur le gradient de N au voisinage de la surface

Il n'est pas encore possible de diffuser de telles cartes.

Un exemple de la variation mondiale de ces lois de distribution du gradient dans les cent premiers mètres est donné dans la Fig. 8. Bien que ces données ne soient pas encore en nombre suffisant, des cartes mondiales préliminaires de ce gradient dépassé pendant 10% et 2% du temps ont été publiées [Bean et autres, 1966] et ces renseignements sont donnés à titre indicatif aux ingénieurs des radiocommunications.

Note 1. — L'application de ces données à un mois donné, au cours d'une année donnée, doit se faire avec la plus grande prudence, car les variations de N_s et de ΔN d'une année à l'autre, pendant un mois donné, peuvent être égales ou supérieures à la variation annuelle des valeurs moyennes mensuelles.

Note 2. — Ces cartes sont aussi à utiliser avec prudence dans les régions montagneuses et près des côtes surtout si le gradient horizontal du paramètre représenté (N_0 ou ΔN) est grand.

3. Modèles d'indice de réfraction pour le calcul des caractéristiques de propagation

Il est parfois souhaitable de disposer d'un modèle du profil de l'indice de réfraction n de l'atmosphère en fonction de la hauteur h au-dessus de la surface de la Terre. Dans le modèle le plus simple, on admet que le gradient de n en fonction de la hauteur est constant; on a montré que les valeurs du champ obtenues sur la base de cette hypothèse d'une atmosphère ayant une caractéristique linéaire sont les mêmes que dans l'hypothèse d'une Terre sans atmosphère, mais de rayon équivalent égal à ka , a étant le rayon réel et k étant défini par la relation:

$$k = \left(1 + \frac{a}{n} \cdot \frac{dn}{dh}\right)^{-1} \quad (1)$$

L'hypothèse d'un gradient constant peut conduire à de grandes erreurs dans le calcul des champs à des altitudes élevées ou dans celui des phases aux basses fréquences, aussi est-il souvent préférable de représenter la variation de n dans l'atmosphère par la formule exponentielle [Bean et Thayer, 1959; Du Castel et Misme, 1957]:

$$n(h) = 1 + N_s \cdot 10^{-6} \cdot e^{-bh} \quad (2)$$

où $N = (n - 1) \cdot 10^6$, l'indice s se rapporte à la valeur à la surface de la Terre, h est la hauteur au-dessus de cette surface, exprimée en km, et b , un nombre défini par:

$$e^{-b} = 1 + \frac{\Delta N}{N_s} \quad (3)$$

Dans cette dernière expression ΔN représente la différence entre la valeur de N à la hauteur de 1 km au-dessus de la surface de la Terre et la valeur de N sur cette surface. On notera que ΔN est un nombre négatif.

Des études ont montré [Bean et Thayer, 1959; Du Castel et Misme, 1957; Lane, 1961; Akiyama, 1971] que ΔN est souvent corrélé avec la valeur de N_s à la surface de la Terre. On peut en déduire les relations de corrélation ci-après qui varient selon le climat:

$$\Delta N = -7,32 \exp(0,005577 N_s) \text{ aux Etats-Unis d'Amérique [Bean et Thayer, 1959]} \quad (4)$$

$$\Delta N = -9,30 \exp(0,004565 N_s) \text{ en République Fédérale d'Allemagne [Bean et autres, 1962]} \quad (5)$$

$$\Delta N = -3,95 \exp(0,0072 N_s) \text{ au Royaume-Uni [Lane, 1961]} \quad (6)$$

$$\Delta N = -2,06 \exp(0,00937 N_s) \text{ en Argentine [C.C.I.R., 1970-1974a]} \quad (7)$$

$$\Delta N = -3,42 \exp(0,00758 N_s) \text{ au Japon [Akiyama, 1971]} \quad (8)$$

Ces formules peuvent être utilisées pour estimer ΔN dans le cas courant où les données météorologiques dont on dispose ne sont disponibles que pour la surface de la Terre. Si $N_s = 289$ et $a = 6370$ km, on obtient à l'aide des formules (2), (3) et (4): $k = \frac{4}{3}$ et $b = 0,136$; ces valeurs définissent l'atmosphère de référence fondamentale. Dans les climats tempérés, les valeurs moyennes de N_s varient entre environ 310 et 320 et celles de ΔN entre environ -38 et -42, en sorte que l'on peut définir une atmosphère moyenne comme une atmosphère pour laquelle $N_s = 315$ et $\Delta N = -40$, de sorte que

$$n(h) = 1 + 315 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,136h} \quad (9)$$

Dans cette atmosphère, le gradient de l'indice de réfraction à la surface correspond à une valeur de k égale à 1,38. Si l'on dispose d'un grand nombre de données obtenues par radiosondes — de façon à pouvoir déterminer avec exactitude la valeur moyenne de la différence ΔN entre les valeurs de N à la surface et à une hauteur de 1 km — il sera possible d'utiliser ces valeurs moyennes mesurées de ΔN et N_s dans les équations (2) et (3) et de déterminer ainsi les caractéristiques de l'atmosphère.

Pour les calculs de l'affaiblissement de transmission, de la phase et de la courbure de la trajectoire des ondes, on admet généralement que l'atmosphère est homogène dans la direction horizontale; cette hypothèse est le plus souvent vérifiée lorsque l'on se trouve dans des conditions de propagation moyenne.

Plusieurs administrations ont émis l'idée que le radioclimat de leur région serait peut-être mieux représenté si l'on adoptait pour $n(h)$ un modèle biexponentiel [Bean et autres, 1966; Wickerts, 1968; Pawlowski, 1967].

4. Caractéristiques des précipitations

Il est bien connu qu'une précipitation n'a pas de structure homogène. De nombreux travaux entrepris dans des pays différents ont conduit à caractériser les intensités de précipitations par un coefficient d'autocorrélation dans l'espace. Cependant aucune loi générale ne paraît se dégager de ces études, ce coefficient étant essentiellement variable. Au Japon, on a mis au point une formule déduite de l'étude des probabilités conditionnelles d'intensités de précipitations mesurées au sol en deux points le long d'un trajet donné. Pour ce pays, cette relation ne dépend ni du lieu ni du pourcentage du temps [Yokoi et autres, 1973].

On peut cependant signaler qu'il existe deux types différents de précipitations. L'un correspond à des nuages stratiformes et les précipitations peuvent couvrir une grande étendue de territoire mais les intensités sont faibles ou moyennes. L'autre correspond à des nuages cumuliformes de type à ondées et se manifeste en cellules qui n'intéressent qu'une faible surface du sol. La dimension horizontale moyenne des cellules varie avec le taux des précipitations comme le montre la Fig. 9, dont les données se rapportent aux zones hydrométéorologiques 1, 2 et 3 [Kinase et autres, 1973; Debrunner et Liniger, 1974]. Des données obtenues en Suisse et aux Etats-Unis d'Amérique montrent que la fonction de densité de probabilité des dimensions des cellules est à peu près exponentielle, pour des réflectivités supérieures à une valeur donnée. Des études de la variation de la réflectivité dans le temps en fonction de la hauteur, effectuées dans la zone hydrométéorologique 1 [Crane, 1972], montrent que ce facteur décroît lentement en fonction de la hauteur jusqu'à l'altitude de la couche de fusion (isotherme 0° C), mais qu'il peut décroître très rapidement au-delà de cette altitude.

On peut utiliser les données de la Fig. 10 comme modèle de la variation verticale de la réflectivité, pour autant que l'on soit en présence de précipitations dont l'intensité ne se rencontre que pendant des pourcentages de l'année inférieurs à 0,001. Pour les intensités de précipitations qui ne sont pas dépassées pendant 0,1 % de l'année, l'altitude moyenne du niveau de fusion définira le point de transition entre la région où la réflectivité diminue avec un taux approximatif de 1 dB/km en fonction de l'altitude au-dessus du sol, et la région supérieure avec un taux de 10 dB/km. Faute de meilleurs renseignements, c'est par interpolation que l'on obtiendra les profils de la réflectivité en fonction de la hauteur, pour des pourcentages intermédiaires du temps.

5. Distribution cumulative des intensités de précipitation

Chaque fois que cela est possible, il faut s'efforcer d'utiliser les valeurs expérimentales de l'intensité de précipitations pour déterminer la distribution cumulative. Cependant, dans certaines régions de la Terre ces valeurs expérimentales n'existent pas. On a essayé de trouver une méthode pour déterminer la distribution cumulative de l'intensité de précipitation en un endroit quelconque. L'utilisation d'un seul paramètre, tel que la hauteur annuelle de précipitation en un point, n'apparaît pas être une méthode entièrement satisfaisante et il semble que cette méthode pourrait être améliorée par l'introduction d'un second paramètre. Des études montrent qu'une estimation acceptable de l'intensité de précipitation peut être faite par cette méthode [Rice et Holmberg, 1973]. Toutefois, on aura avantage à utiliser les valeurs expérimentales de la hauteur d'eau moyenne annuelle plutôt que les valeurs de cette quantité indiquée de façon approximative par des cartes.

En attendant de disposer de méthodes améliorées, on propose d'utiliser une méthode approchée des climats pluviométriques. La Fig. 11 présente une estimation des distributions cumulatives de l'intensité de précipitation pour cinq différentes zones et les limites approchées de ces zones sont dessinées sur la Fig. 12. Ces courbes ne devraient être utilisées que dans le cas où aucune information plus précise pour l'endroit considéré n'est disponible. En réalité, la ligne de démarcation entre deux zones quelconques n'est pas définie de façon précise et la distribution cumulative varie fortement à l'intérieur d'une même zone et d'une année à l'autre. Le document [C.C.I.R., 1970-1974b] contient des statistiques détaillées des précipitations pour la région de l'U.R.S.S.

Les mesures faites dans de nombreux pays montrent que pour de faibles pourcentages de temps, c'est-à-dire inférieurs à 0,01, il existe de très grandes variations d'intensités de précipitations d'une année sur l'autre. Il faut une très longue période de temps, certainement supérieure à dix ans, pour définir le régime pluvieux d'une région.

Si on essaie de mesurer l'intensité de précipitation correspondant à des pourcentages de temps inférieurs à 0,01 % du mois, on s'aperçoit que pendant le temps très court correspondant (environ 4 minutes), il n'existe qu'un très petit nombre d'échantillons de mesure, quelquefois un seul. De ce fait, toute statistique est impossible à moins de disposer d'une période de mesure tellement longue qu'il n'est pas évident que le climat reste stationnaire pendant cette période. Toutefois, afin de fournir des données à l'ingénieur, une méthode d'estimation de ces intensités est donnée dans le Rapport 233-3. On demande aux administrations d'intensifier les études statistiques appliquées aux régimes pluvieux pour pallier cette déficience.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKIYAMA, T. [1971] Tropospheric radio-refractivity gradient over Japan and its vicinity. *J. Inst. Elec. Comm.*, Japon, Vol. 54-B, 4, 175.
- BEAN, B.R. et THAYER, G.D. [1959] On models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, 47, 740-755.
- BEAN, B.R., CAHOON, B.A., SAMSON, C.A. et THAYER, G.D. [1966] A world-wide atlas of radio refractive index. Monograph No. 1, Environmental Sciences Services Administration, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- BEAN, B.R., FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1962] Die Radiometeorologie und ihre Bedeutung für die Ausbreitung der m-, dm- und cm-Wellen auf grosse Entfernungen (Importance de la radiométéorologie pour la propagation à grande distance des ondes métriques, décimétriques et centimétriques). *NTZ*, 1, 9.
- BEAN, B.R., HORN, J.D. et OZANICH, A.M. Jr. [novembre 1960] Climatic charts and data of the radio refractive index for the United States and the World. NBS Monograph No. 22. Supt. of Docs., United States Government Printing Office, Washington, D.C.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/2, Argentine.
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/79, U.R.S.S.
- CRANE, R.K. [novembre 1972] Virginia precipitation scatter experiment — data analysis. NASA/GSFC X-750-73-55, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.
- DEBRUNNER, W.E. et LINIGER, M. [1974] Einfluss der Struktur von Regengebieten auf die Ausbreitung von Mikrowellen (Influence de la structure des zones pluvieuses sur la propagation par hyperfréquences). *PTT Techn. Mitteilungen* (Suisse).
- DU CASTEL, F. et MISME, P. [décembre 1957] Eléments de radioclimatologie. *Onde électrique*.
- KINASE, A. et autres [octobre 1973] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz band at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Series No. 171 (Japon).
- LANE, J.A. [1961] The radio refractive index gradient over the British Isles. *Journal of Atmos. and Terr. Phys.*, Vol. 21, 157-166.
- MISME, P., BEAN, B.R. et THAYER, G.D. [août 1960] Models of the atmospheric radio refractive index, *Proc. IRE*, Vol. 48, 8.
- PAWLOWSKI, W. [1967] Distribution de la réfractivité dans le sud de la mer Baltique au cours de l'été 1964, du point de vue de l'influence de la circulation atmosphérique et du type des masses d'air (en polonais). *Acta Geophysica Polonica*, Vol. XV, 4.
- RICE, P.L. et HOLMBERG, N.R. [octobre 1973] Cumulative time statistics of surface point rainfall rates. *Trans. IEEE Comm.* Doc. 10.
- WICKERTS, S. [1968] Atmosphère radiométéorologique normale (en suédois). Institut de recherche du Ministère de la Défense nationale, Dep. 3. Rapport A 3704-60.
- YOKOI, H., YAMADA, M. et OGAWA, A. [octobre 1973] Measurement of precipitation attenuation for satellite communication in low elevation angles. Inter-Union Commission on Radio Meteorology, Nice, France.

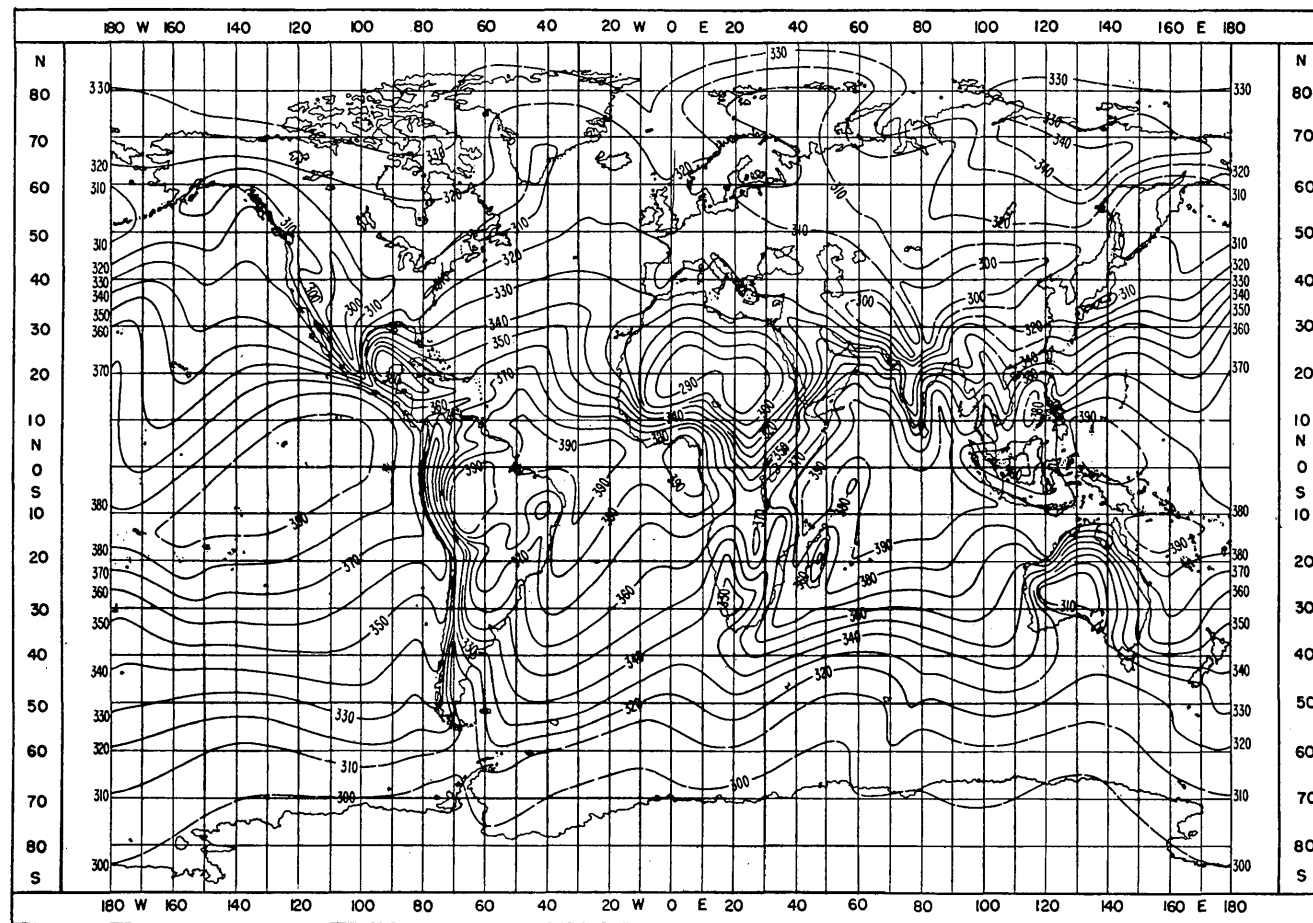


FIGURE 1
Valeur moyenne de N_0 : février

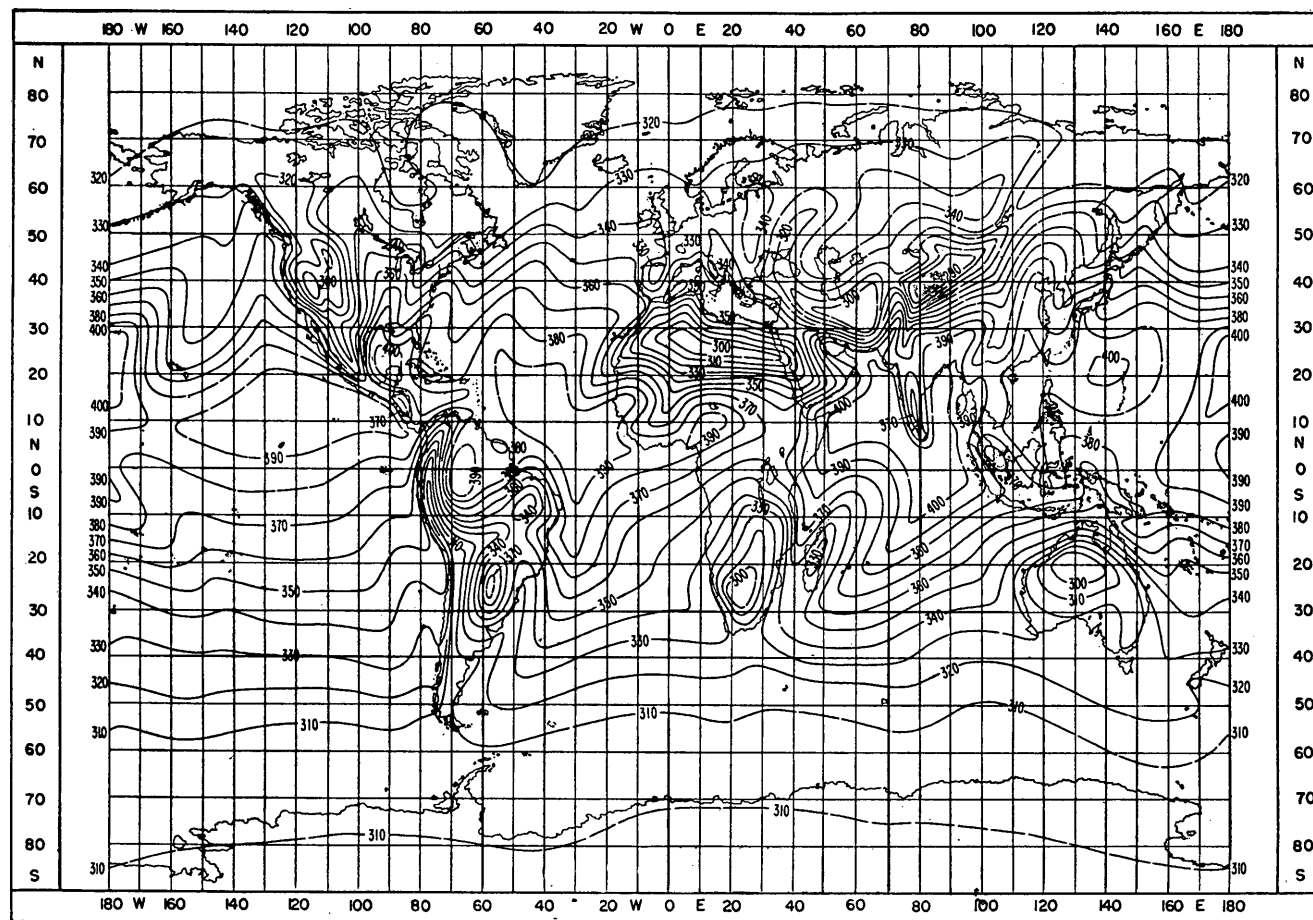


FIGURE 2

Valeur moyenne de N_0 : août

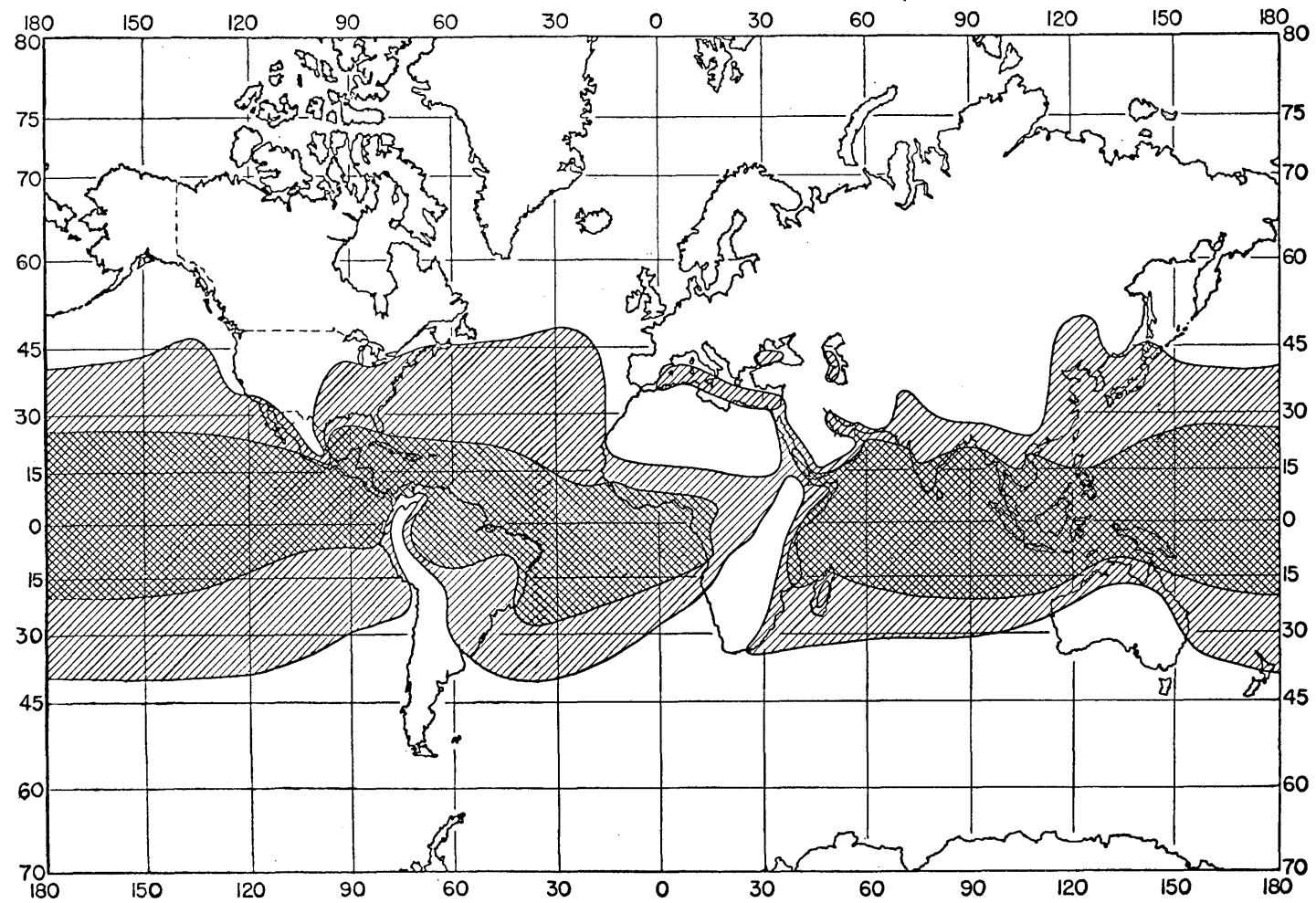


FIGURE 3



valeur moyenne mensuelle de $N_0 > 350$ unités N pendant tous les mois



valeur moyenne mensuelle de $N_0 > 350$ unités N pendant un mois au moins

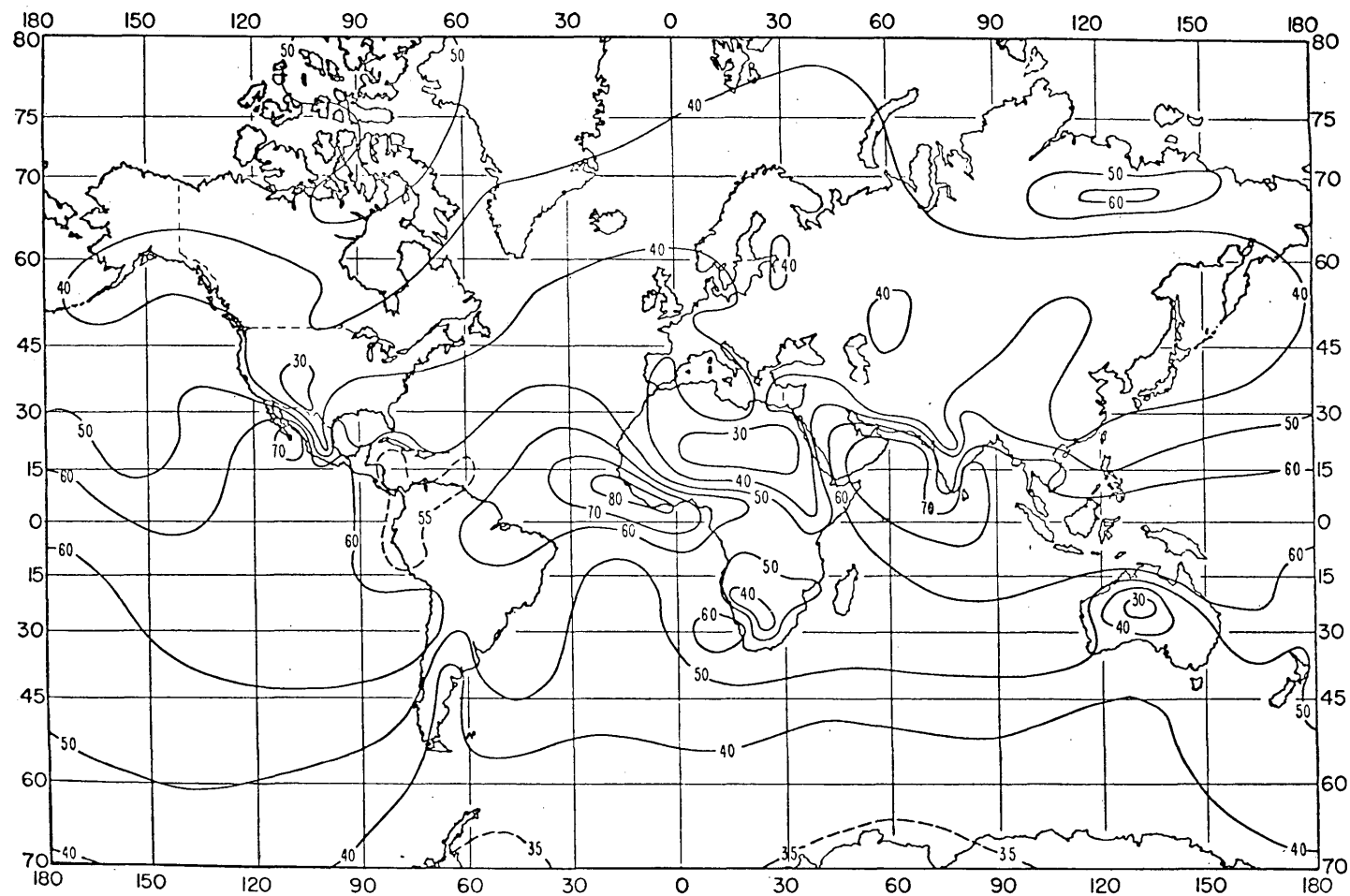


FIGURE 4

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : février

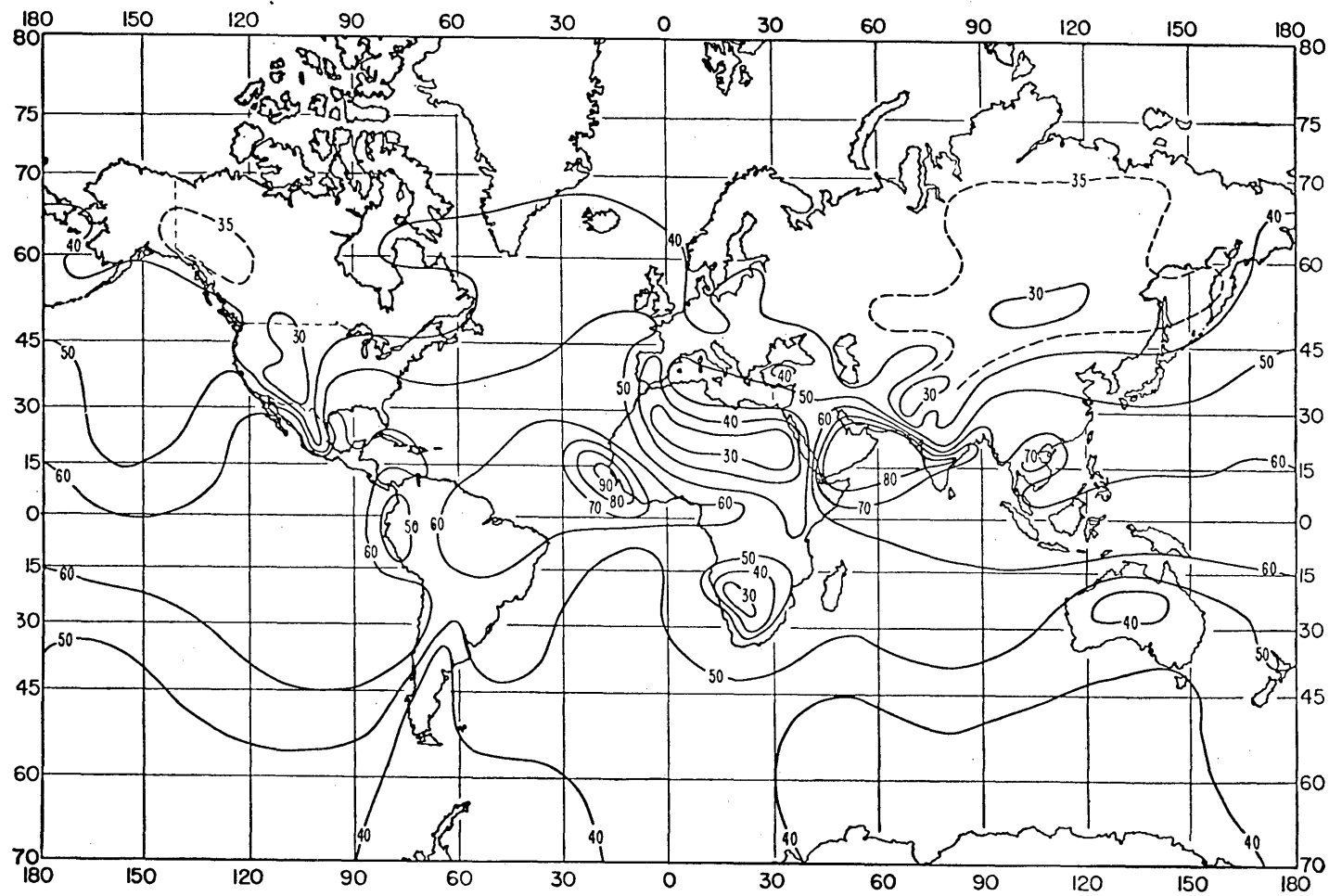


FIGURE 5

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : mai

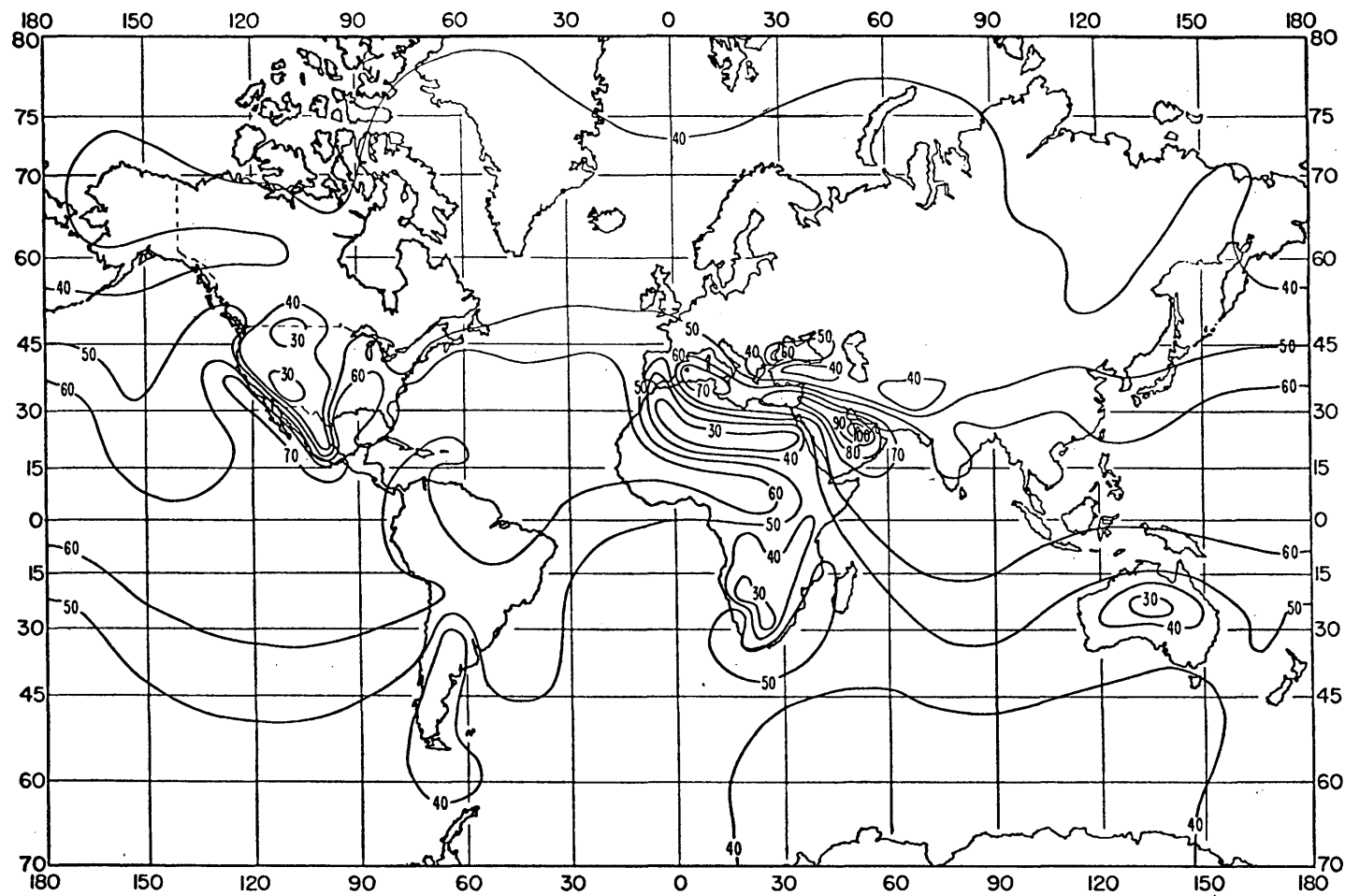


FIGURE 6

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : août

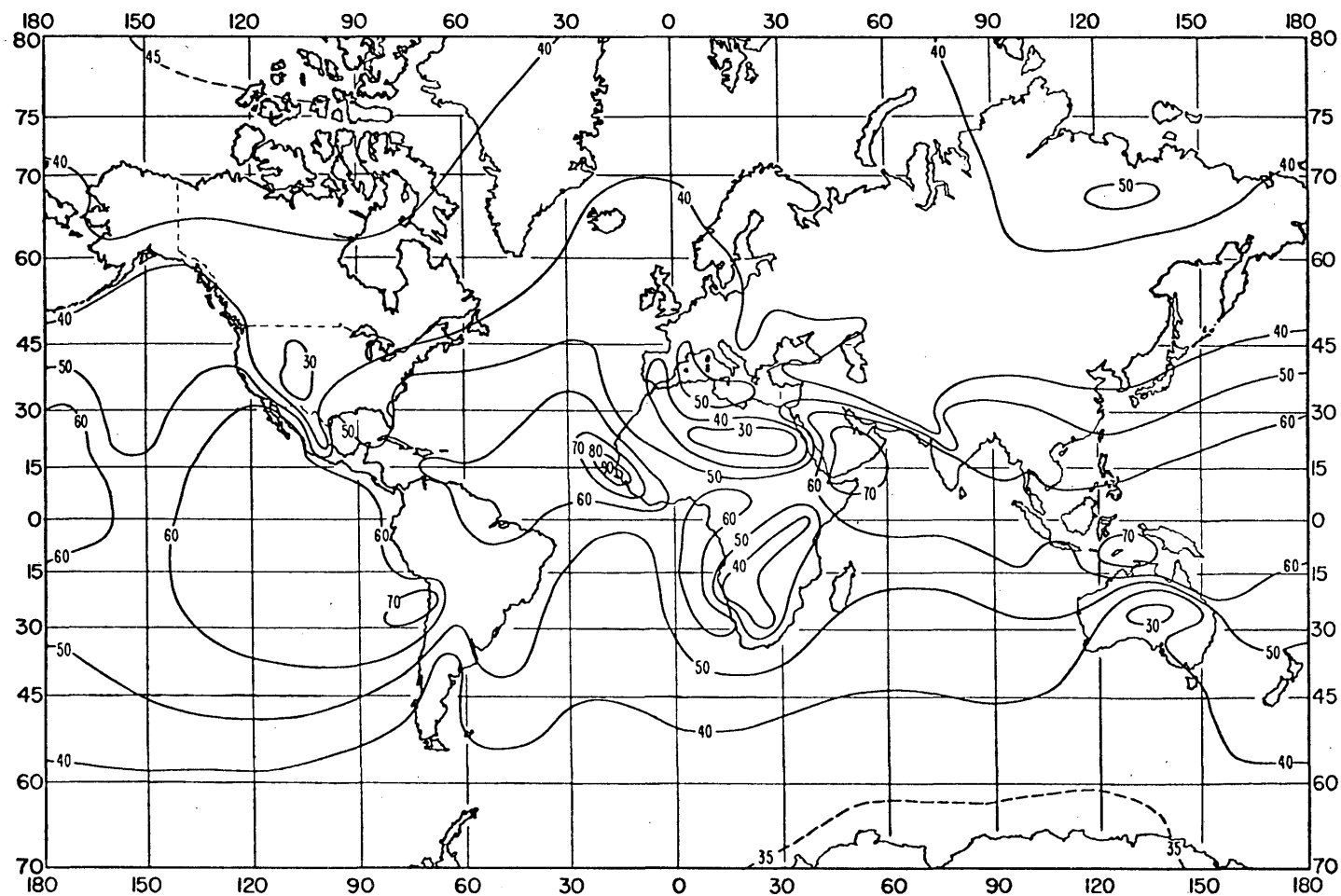


FIGURE 7

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : novembre

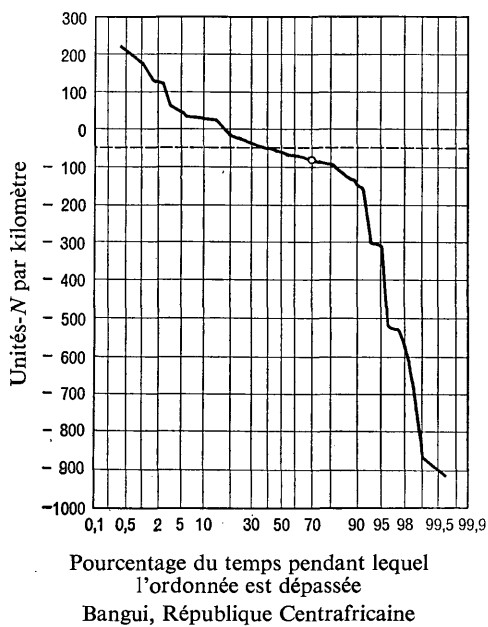
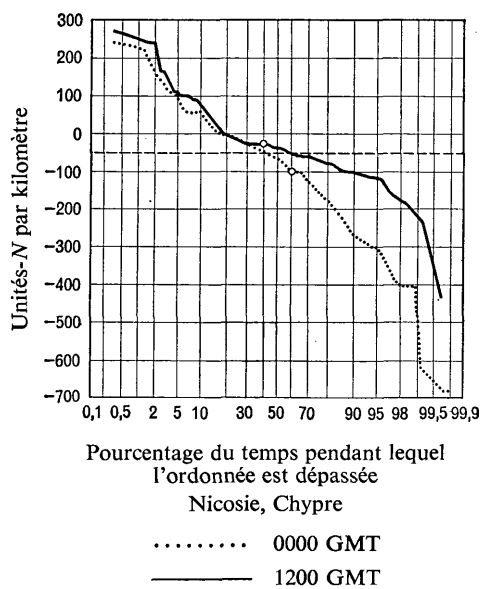
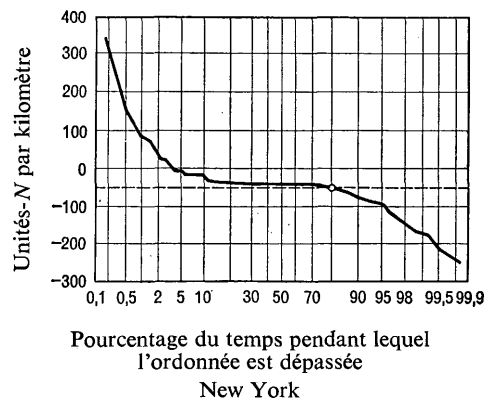
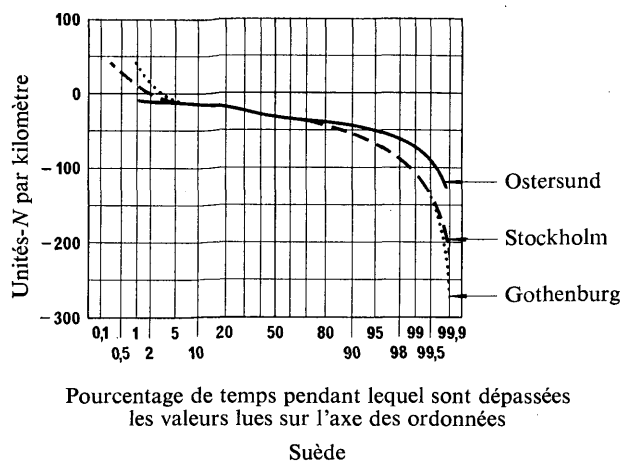


FIGURE 8

Répartitions de probabilité cumulées de dN/dh jusqu'à 100 m au-dessus du sol

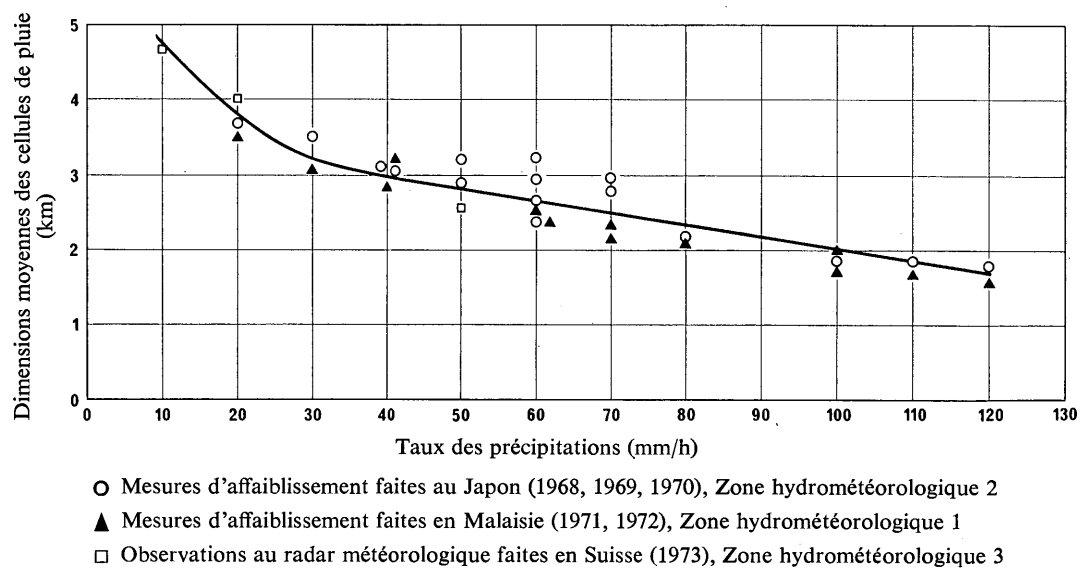


FIGURE 9

Dimensions moyennes des cellules de pluie en fonction du taux des précipitations

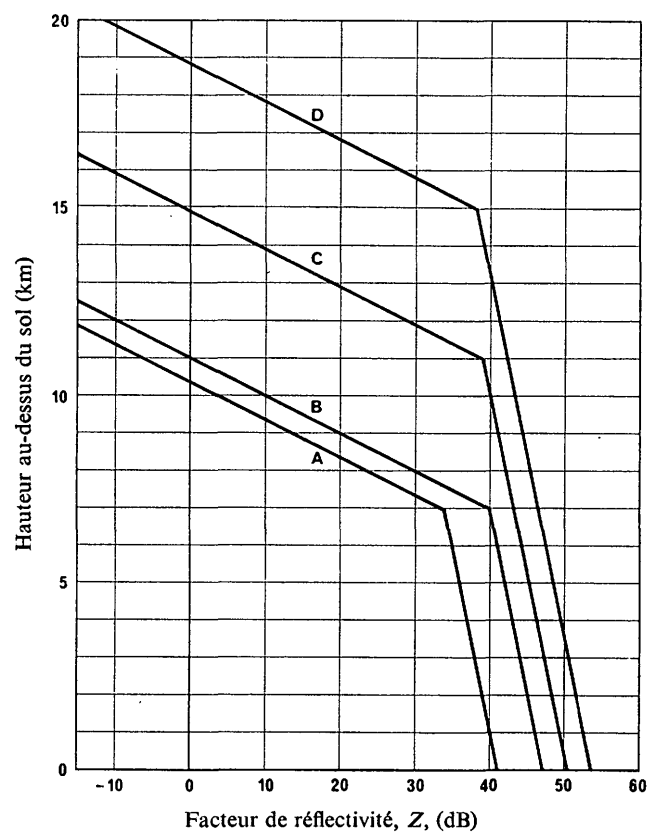


FIGURE 10

*Profils des facteurs de réflectivité proposés
pour la diffusion par les hydrométéores*

- A: Zone hydrométéorologique 5
- B: Zones hydrométéorologiques 3 et 4
- C: Zone hydrométéorologique 2
- D: Zone hydrométéorologique 1

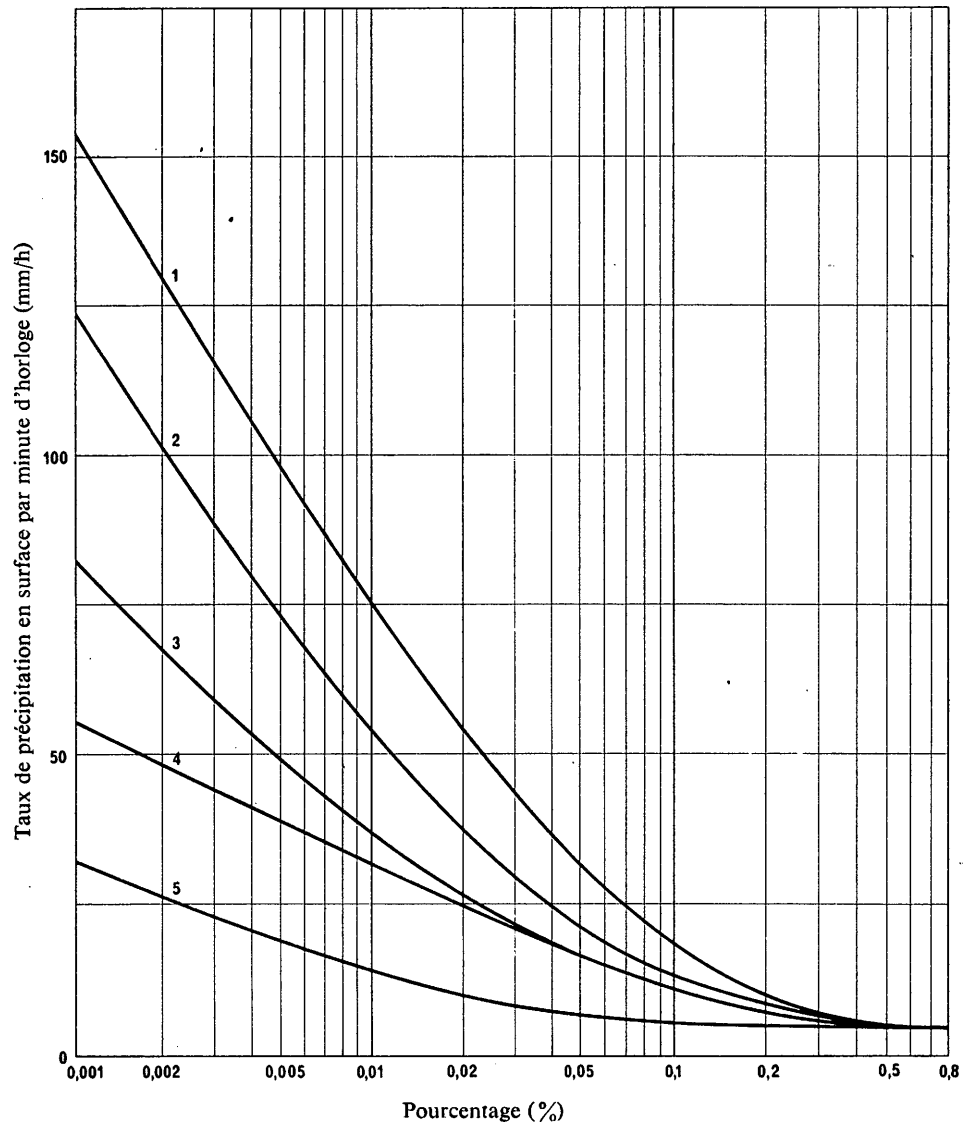


FIGURE 11

Pourcentage du temps d'une année moyenne pendant lequel le taux de précipitation indiqué est dépassé pour les cinq zones hydrométéorologiques

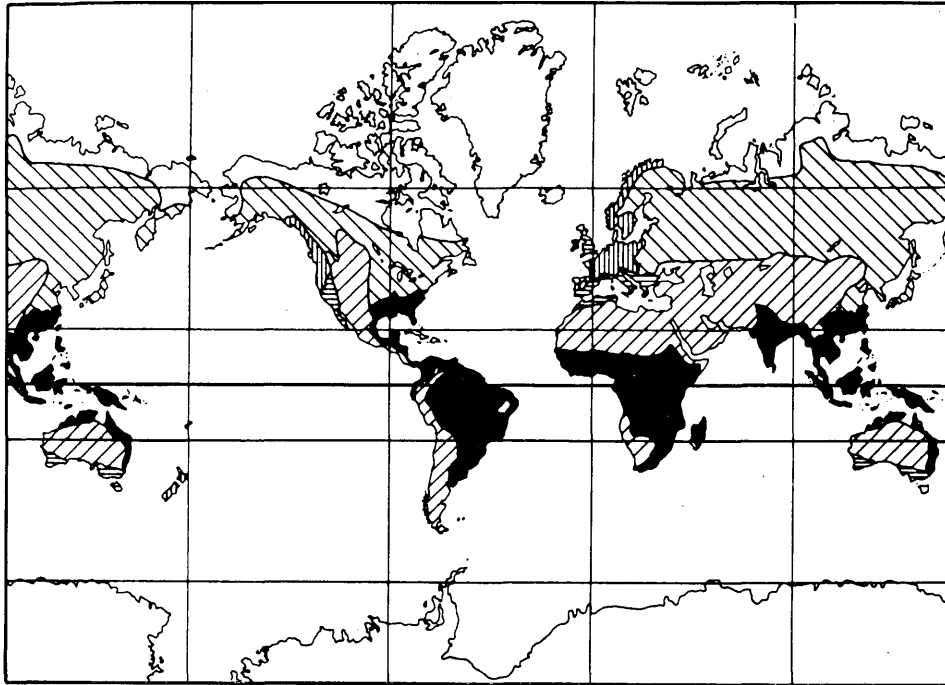


FIGURE 12

- 1
2 Régions correspondant aux distributions de l'intensité de précipitation représentées Fig. 11
3
4
5

SECTION 5D: QUESTIONS RELATIVES A LA RADIODIFFUSION ET AUX SERVICES
MOBILES (DE TERRE ET PAR SATELLITE)

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 311-2

**MODE DE PRÉSENTATION DES DONNÉES OBTENUES AU COURS
DE L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE**

Radiodiffusion et télévision

(1953 – 1956 – 1959 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que les ingénieurs chargés d'organiser les services de radiodiffusion et de télévision dans la bande de fréquences comprise entre 30 MHz et 18 GHz ont un besoin urgent de directives pour orienter leurs travaux;
- b) qu'il est important de déterminer l'influence des conditions météorologiques et de la nature du terrain sur le champ dans cette bande, en des lieux situés tant en deçà qu'au-delà de l'horizon;
- c) que, pour faciliter la comparaison des résultats, il est souhaitable que les administrations et les exploitations privées présentent d'une manière uniforme les données concernant les champs;
- d) qu'il n'est pas encore possible de fixer, de manière définitive, un mode de présentation des résultats et une méthode d'analyse statistique satisfaisant au mieux les besoins exprimés dans les considérants a) et b),

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

- 1. que l'on devrait déterminer les champs dépassés pendant 0,1 %, 1 %, 5 %, 10 %, 50 %, 90 %, 99 % et 99,9 % du temps total, chaque fois que cela est possible, pour tous les emplacements où les mesures ont été effectuées;
- 2. que, dans le cas de la radiodiffusion et de la télévision, on devrait déterminer les valeurs médianes des champs dépassés en 10 %, 50 % et 90 % des emplacements;
- 3. qu'il est souhaitable de compléter cette statistique globale par une analyse plus fine et plus précise; à cet effet, on pourrait s'inspirer des méthodes proposées dans l'Annexe I au présent Avis, dans le Doc. 172 (France), Varsovie, 1956 ou dans le Doc. V/28 (France), Genève, 1958;
- 4. que l'on devrait présenter les résultats statistiques des mesures de champ sur du papier spécial pour études de probabilité. On devrait porter en ordonnées, les valeurs en dB par rapport à 1 microvolt par mètre de champ, ces valeurs croissant de bas en haut; en abscisses, le pourcentage de la durée totale d'enregistrement pris en considération ou le pourcentage des emplacements suivant une échelle conforme à la loi de probabilité normale, les pourcentages allant en croissant de gauche à droite. Un exemple de répartition logarithmique normale représentée sur un papier pour études de probabilité figure à l'Annexe II;
- 5. que toutes les valeurs de champ mesurées devraient être normalisées pour correspondre à celles qui seraient obtenues avec un dipôle demi-onde vertical ou avec un dipôle demi-onde horizontal perpendiculaire à la direction de réception, le dipôle étant, dans les deux cas, placé à une hauteur au-dessus du sol égale à plusieurs longueurs d'onde au moins et rayonnant une puissance de 1 kW;

6. que, dans le cas de la radiodiffusion et de la télévision, chaque fois que cela est possible, toutes les mesures devraient être rapportées à une antenne réceptrice placée à 10 m au-dessus du sol, cette antenne ne devant pas être très directionnelle dans le plan vertical.

ANNEXE I

Il convient de noter que les recommandations ci-dessus s'appliquent particulièrement à la propagation des ondes sur de grandes distances (se rapportant particulièrement aux problèmes de brouillage en radiodiffusion sonore et en télévision) et aussi aux cas caractéristiques de propagation dans les zones de service des stations de télévision et de radiodiffusion sonore. Bien que, dans ces cas, l'intérêt principal soit de déterminer celles des valeurs de champ qui sont dépassées pendant divers pourcentages du temps total à différentes distances, il peut être cependant utile pour une analyse plus poussée d'analyser les mesures pendant les périodes d'une heure. Ceci permettrait d'effectuer des études sur les variations diurnes, tandis que les variations saisonnières pourraient, de même, être étudiées en groupant les valeurs obtenues à certaines heures déterminées du jour pour un mois entier et en examinant comment la répartition des champs varie d'un mois à l'autre. Ce procédé aurait, en outre, l'avantage de permettre ultérieurement d'établir une corrélation entre les résultats présentés sous cette forme et les données de la météorologie.

Pour l'étude de la propagation des ondes métriques, décimétriques ou centimétriques sur des liaisons fixes à portée optique, une corrélation plus précise entre le champ reçu et les conditions atmosphériques régnantes pourrait être nécessaire. Pour cette raison, et d'autres encore, on a estimé que les résultats devraient pouvoir être présentés pour chaque heure et chaque jour de chaque mois pendant lesquels les essais ont été effectués. Simultanément, il serait nécessaire d'établir des courbes de répartition d'ensemble pour des périodes d'un mois, afin de permettre l'étude des variations saisonnières; les ingénieurs chargés de projets auront sans doute besoin également de courbes de répartition d'ensemble pour des périodes plus longues. Il est généralement commode de rapporter les résultats à la valeur du champ en espace libre pour la distance et les autres conditions considérées.

Bien qu'en règle générale il soit préférable de conserver, pour pouvoir s'y reporter, les relevés originaux des champs mesurés, il est indispensable de prévoir un mode de présentation des données qui soit plus simple et dans lequel ces données soient plus accessibles. Une méthode consiste à porter sur du papier à échelle linéaire les valeurs maximale, médiane et minimale du champ pour chaque heure, la dispersion des résultats horaires étant représentée par une ligne verticale. De plus, en déterminant les valeurs médianes horaires ou les valeurs horaires correspondant à d'autres pourcentages de temps, il est possible d'obtenir, pour une heure du jour donnée, la répartition statistique de ces valeurs au cours d'un mois (ou d'une autre période désirée de temps).

ANNEXE II

Une échelle de probabilité est définie par:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{1}{2}\xi^2} d\xi$$

pour des abscisses $x = 0$, $x \rightarrow \infty$ et $x \rightarrow -\infty$ les valeurs correspondantes de la probabilité $P(x)$ sont 50%, 0% et 100%.

Une répartition suivant la loi normale de l'amplitude F d'un champ mesuré en décibels (distribution logarithmique normale) est donnée par:

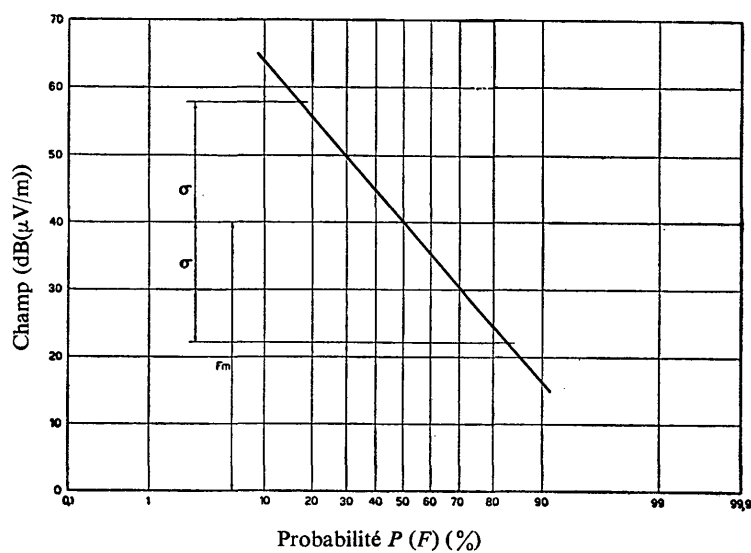
$$P(F) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_F^\infty e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{f-F_m}{\sigma}\right)^2} df$$

$P(F)$ est la probabilité (pourcentage de temps ou d'emplacements) que le champ E , exprimé en dB ($\mu V/m$), ($F = 20 \log E$), dépasse le niveau F .

F_m est la valeur médiane de F , c'est-à-dire celle qui est dépassée pendant 50% du temps ou pour 50% des emplacements. σ est l'écart type, de sorte que l'on a $P(F_m - \sigma) \approx 84\%$ et $P(F_m + \sigma) \approx 16\%$.

Il est souvent intéressant de connaître le champ dépassé pendant 1 % ou 10 % du temps; lorsque la répartition est logarithmique normale, la courbe de répartition est une droite, et les écarts correspondants sont donnés par $2,32 \sigma$ et $1,28 \sigma$.

La figure ci-dessous est un exemple de présentation d'une répartition logarithmique normale.



Graphique montrant une répartition logarithmique normale de mesure de champ

AVIS 370-2 *

**COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES
DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 ET 1000 MHz ******Services de radiodiffusion**

(Programme d'études 7D/5)

(1951 – 1953 – 1956 – 1959 – 1963 – 1966 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire de fournir des indications aux ingénieurs chargés des plans relatifs aux services de radiodiffusion et aux services mobiles travaillant dans les bandes des ondes métriques et décimétriques;
- b) qu'il est important de déterminer la distance géographique minimale entre les stations travaillant sur les mêmes voies ou sur des voies adjacentes, afin d'éviter les brouillages intolérables occasionnés par une propagation troposphérique à grande distance;
- c) que les courbes figurant en annexe sont fondées sur l'analyse statistique d'un nombre considérable de données expérimentales (voir le Rapport 239-3) ***,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

- 1. que les courbes révisées figurant aux Annexes I et II soient adoptées pour être utilisées provisoirement **** dans les conditions suivantes:
 - 1.1 Les valeurs de champ ont été ajustées de façon à correspondre à une puissance de 1 kW rayonnée par un doublet demi-onde.
 - 1.2 La hauteur de l'antenne d'émission est définie comme étant la hauteur de cette antenne au-dessus du niveau moyen du sol entre les distances de 3 km et de 15 km à partir de l'émetteur, dans la direction du récepteur.
 - 1.3 La hauteur de l'antenne de réception est définie comme étant la hauteur au-dessus du terrain local.
 - 1.4 Un paramètre Δh est utilisé pour définir le degré d'irrégularité du terrain; il représente la différence entre les altitudes dépassées sur 10 % et 90 % du trajet de propagation entre 10 km et 50 km de distance de l'émetteur (voir Fig. 7).
 - 1.5 Des méthodes permettant de déterminer les champs au-dessus de trajets mixtes sont décrites dans le Rapport 239-3.
 - 1.6 L'effet d'une modification de la hauteur de l'antenne de réception est étudié au § 4.2 du Rapport 239-3.
 - 1.7 En ce qui concerne l'utilisation, dans les services mobiles terrestres, des courbes de propagation décrites dans le présent Avis, il convient de se référer au Rapport 567.

* Adopté à l'unanimité; l'attention des Commissions d'études 8, 10 et 11 est attirée sur cet Avis.

** Il faut souligner que les courbes de cet Avis sont destinées à résoudre les problèmes de brouillage sur une zone étendue dans la planification des services de radiodiffusion et des services mobiles. On ne doit pas les employer pour des liaisons entre deux points déterminés, car on peut, dans ce dernier cas, déterminer le profil réel du terrain et employer des méthodes plus précises pour prévoir le champ.

*** Les courbes pour les trajets maritimes et les trajets mixtes terre-mer sont basées principalement sur des mesures effectuées en Europe dans les régions de la mer du Nord et de la Méditerranée. Il est demandé aux administrations de vérifier dans quelle mesure ces courbes s'appliquent aux autres régions de mer froide et de mer chaude respectivement.

**** Il faut souligner que ces courbes sont basées sur des données obtenues principalement en climat tempéré et doivent être utilisées avec précaution dans d'autres climats.
Les courbes de propagation pour la radiodiffusion sur le Continent africain sont contenues dans les Actes finals de la Conférence africaine de radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, Genève, 1963, pages 343-379.

ANNEXE I

BANDES DES ONDES MÉTRIQUES (30 A 250 MHz)

1. Les courbes de l'Annexe I ont été établies principalement à l'aide de données fournies par les Etats-Unis d'Amérique et par les pays d'Europe occidentale; beaucoup plus de mesures ont été faites aux distances allant jusqu'à environ 500 km qu'aux distances supérieures et, ainsi, les courbes ont leur fiabilité plus grande jusqu'à 500 km environ.
2. Les Fig. 1 à 4c indiquent les champs dépassés pour 50 % des emplacements de réception pendant, respectivement, 50 %, 10 %, 5 % et 1 % du temps. Les courbes correspondant à des valeurs dépassées pendant 50 % du temps sont valables pour tous les trajets. Les courbes représentées à la Fig. 2a et correspondant aux valeurs dépassées pendant 10 % du temps sont valables pour les trajets terrestres et maritimes dans la région de la mer du Nord. Les Fig. 3a et 4b contiennent les courbes correspondant aux valeurs dépassées pendant 5 % et 1 % du temps sur des trajets maritimes dans la région de la mer du Nord, tandis que les Fig. 2b, 3b et 4c indiquent les valeurs dépassées pendant, respectivement, 10 %, 5 % et 1 % du temps sur les trajets maritimes de la région méditerranéenne. L'expérience a montré qu'en Méditerranée et dans le golfe du Mexique, plus spécialement en été, les champs peuvent dépasser d'une valeur pouvant atteindre 20 dB ceux des courbes relatives à la mer du Nord, pour des distances supérieures à 200 km environ.

Les valeurs de champ, obtenues par extrapolation (courbes en tirets), pour des distances supérieures à 700 km environ sur des trajets terrestres, devront être utilisées avec prudence.

3. Les champs donnés dans les Fig. 1, 2a et 4a se rapportent à 50 % des points de réception pour un type de terrain moyennement vallonné tel qu'on le trouve fréquemment en Europe et en Amérique du Nord. Pour ce type de terrain, les champs pour d'autres pourcentages de points de réception peuvent être obtenus à l'aide de la courbe de distribution donnée dans la Fig. 5.

Ni les courbes des Fig. 1, 2a ou 4a, ni la courbe de distribution de la Fig. 5 ne peuvent donner des indications très exactes dans le cas de terrains très vallonnés ou montagneux. Il convient d'utiliser, pour les bandes II et III et pour ces types de terrain, la valeur du facteur de correction d'affaiblissement (en dB) indiqué à la Fig. 8a.

4. On sait que le champ médian varie dans les différentes régions selon le climat; les données recueillies aux Etats-Unis et en Europe occidentale dans les conditions climatiques les plus diverses montrent qu'il est possible d'établir une corrélation entre la valeur médiane des champs observés et le gradient de l'indice de réfraction dans le premier kilomètre d'atmosphère au-dessus du niveau du sol. Si ΔN est défini comme $10^6 (n_1 - n_s)$, où n_s représente l'indice de réfraction à la surface du sol, et n_1 l'indice de réfraction à 1 km de hauteur au-dessus du sol, on a, dans une atmosphère normale, $\Delta N \approx -40$; les courbes 50 % de la Fig. 1 s'appliquent à ce cas. Si la valeur moyenne de ΔN dans une région donnée est sensiblement différente de -40 , on obtiendra la valeur médiane de champ pour les distances au-delà de l'horizon en appliquant aux courbes un facteur de correction de $-0,5 (\Delta N + 40)$ dB. Dans le cas où l'on ne connaît pas ΔN , mais où l'on a des données qui permettent de calculer la valeur moyenne de N_s où $N_s = 10^6 (n_s - 1)$, on peut, au moins pour les régions tempérées, appliquer un autre facteur de correction, qui est de $0,2 (N_s - 310)$ dB. Bien que ces facteurs de correction n'aient été établis jusqu'ici que pour les zones géographiques susmentionnées, ils peuvent cependant servir d'indication pour les corrections qui pourraient être nécessaires dans d'autres zones géographiques. La mesure dans laquelle il est correct d'appliquer des corrections similaires aux courbes de champ dépassé pendant 1 % et 10 % du temps n'est pas connue. On s'attend, toutefois, à ce qu'une correction importante soit nécessaire pour les valeurs dépassées pendant 1 % et 10 % du terme dans les régions où la superréfraction prédomine pendant une partie appréciable du temps.
5. Les courbes des valeurs du champ des ondes métriques pour 1 % du temps sur des trajets mixtes (terrestre et maritime), avec une antenne d'émission à la hauteur de 300 m, sont tracées sur la Fig. 6. En traçant ces courbes, on a supposé que les tronçons de trajet terrestre de part et d'autre du trajet maritime étaient de longueur égale. Pour d'autres conditions, les estimations des valeurs du champ sur des trajets mixtes devront être faites selon la méthode décrite dans le Rapport 239-3.

ANNEXE II

BANDES DES ONDES DÉCIMÉTRIQUES (450 A 1000 MHz)

1. Les Fig. 9, 10 et 11 représentent les champs dépassés en 50 % des emplacements pendant respectivement 50 %, 10 % et 1 % du temps sur des trajets terrestres. Elles se rapportent à un type de terrain moyennement vallonné que l'on rencontre fréquemment en Europe et en Amérique du Nord et qui est caractérisé par une valeur $\Delta h = 50$ m. Pour les Δh supérieurs ou inférieurs à cette valeur, il convient d'appliquer une correction à ces courbes telle qu'elle est donnée dans la Fig. 8b.
2. On estime que les champs indiqués dans les Fig. 9, 10 et 11 sont dépassés en 50 % des points de réception sur un terrain moyennement vallonné, tel qu'on le rencontre fréquemment en Europe et en Amérique du Nord. Pour ce type de terrain, les champs pour d'autres pourcentages des emplacements de réception peuvent être obtenus à l'aide des courbes de distribution données dans la Fig. 12.
3. La fig. 13 donne les valeurs du champ dépassé en 50 % des points de réception dans des régions côtières pendant 50 % du temps; cette figure se rapporte à la propagation dans la région de la mer du Nord et dans les parties centre et nord de la mer Méditerranée. Les Fig. 14a, 15a et 16a donnent les valeurs du champ dépassé pendant 10 %, 5 % et 1 % du temps respectivement; elles se rapportent à la propagation dans la région de la mer du Nord tandis que les Fig. 14b, 15b et 16b se rapportent à la propagation dans les parties centre et nord de la mer Méditerranée, pendant les mêmes pourcentages de temps.
4. Ces courbes sont basées sur des valeurs à long terme (plusieurs années) et peuvent être considérées comme étant représentatives des conditions climatiques moyennes qui règnent dans toutes les régions tempérées. Il convient de noter, cependant, que pour des périodes courtes (quelques heures par exemple, voire quelques jours), il peut exister des champs très supérieurs à ceux indiqués dans les Fig. 9 à 16 inclusivement.
5. Les Fig. 17a et 17b représentent les courbes des valeurs du champ pour 1 % et 10 % du temps sur des trajets mixtes (terrestre et maritime), situés dans la région de la mer du Nord avec une antenne d'émission à 300 m, dans l'hypothèse où les tronçons de trajet terrestre de part et d'autre du trajet maritime sont de longueur égale. Pour d'autres conditions, les estimations des valeurs du champ sur des trajets mixtes devront être faites selon la méthode décrite dans le Rapport 239-3.

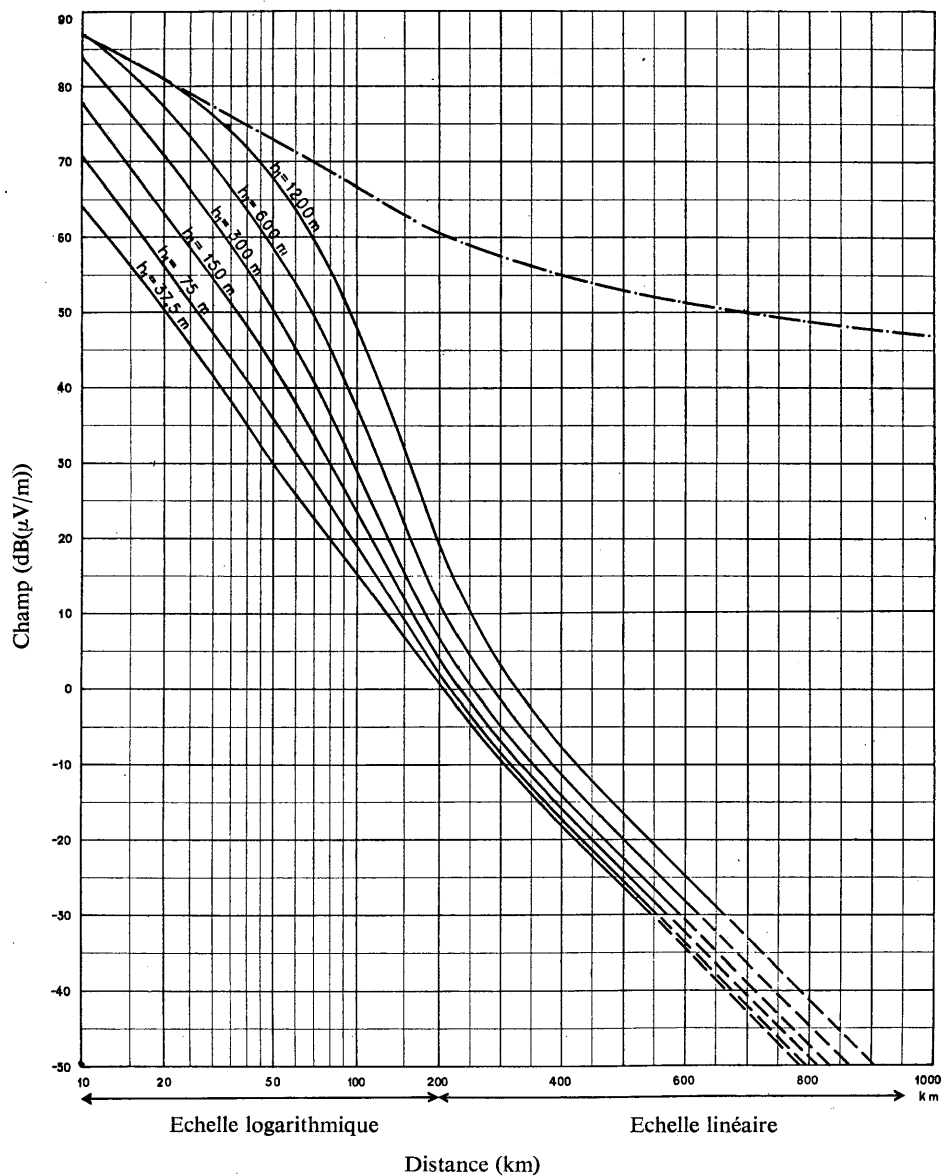


FIGURE 1

Champ ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Terre et mer (région de la mer du Nord et de la Méditerranée)
50% du temps — 50% des emplacements — $h_3 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

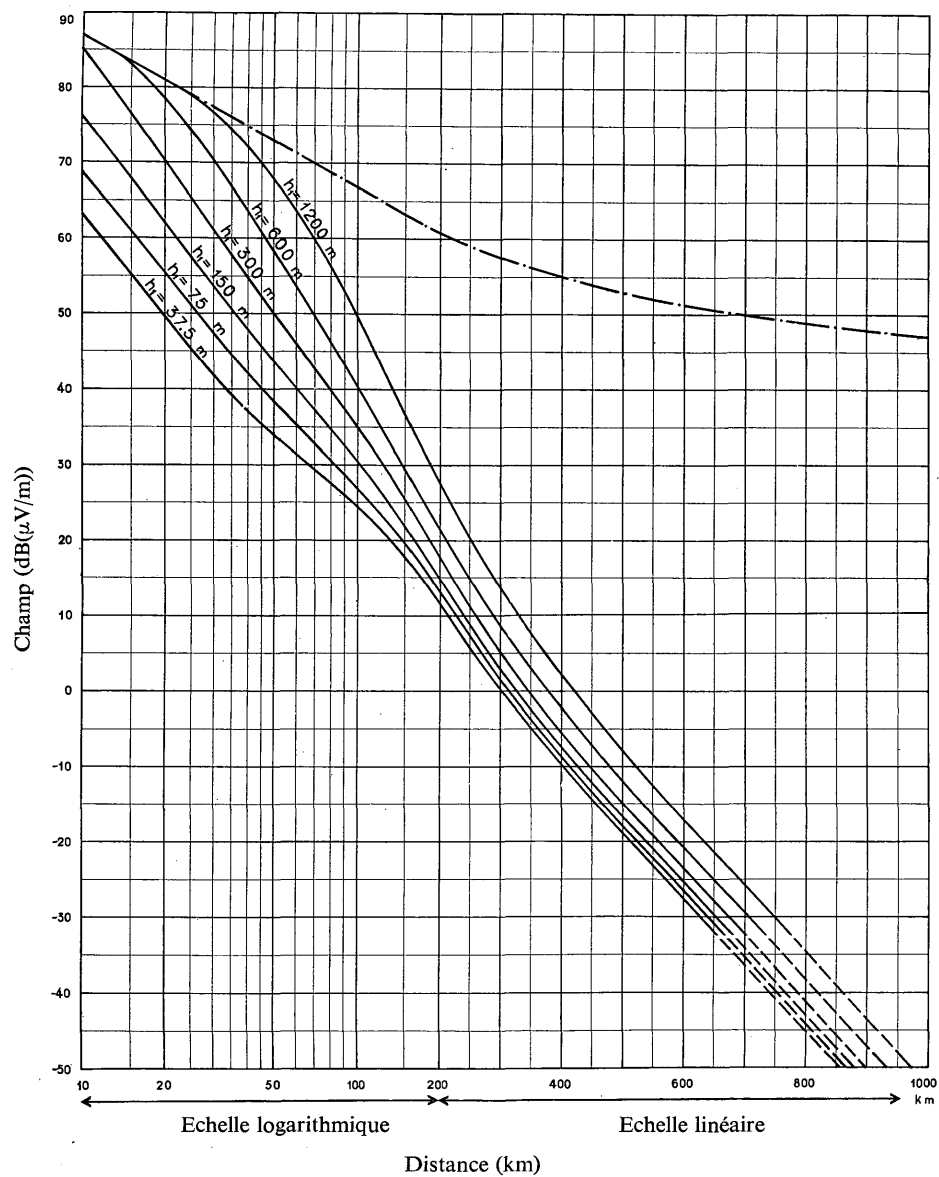


FIGURE 2a

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Terre et mer (région de la mer du Nord) —
10% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · Espace libre

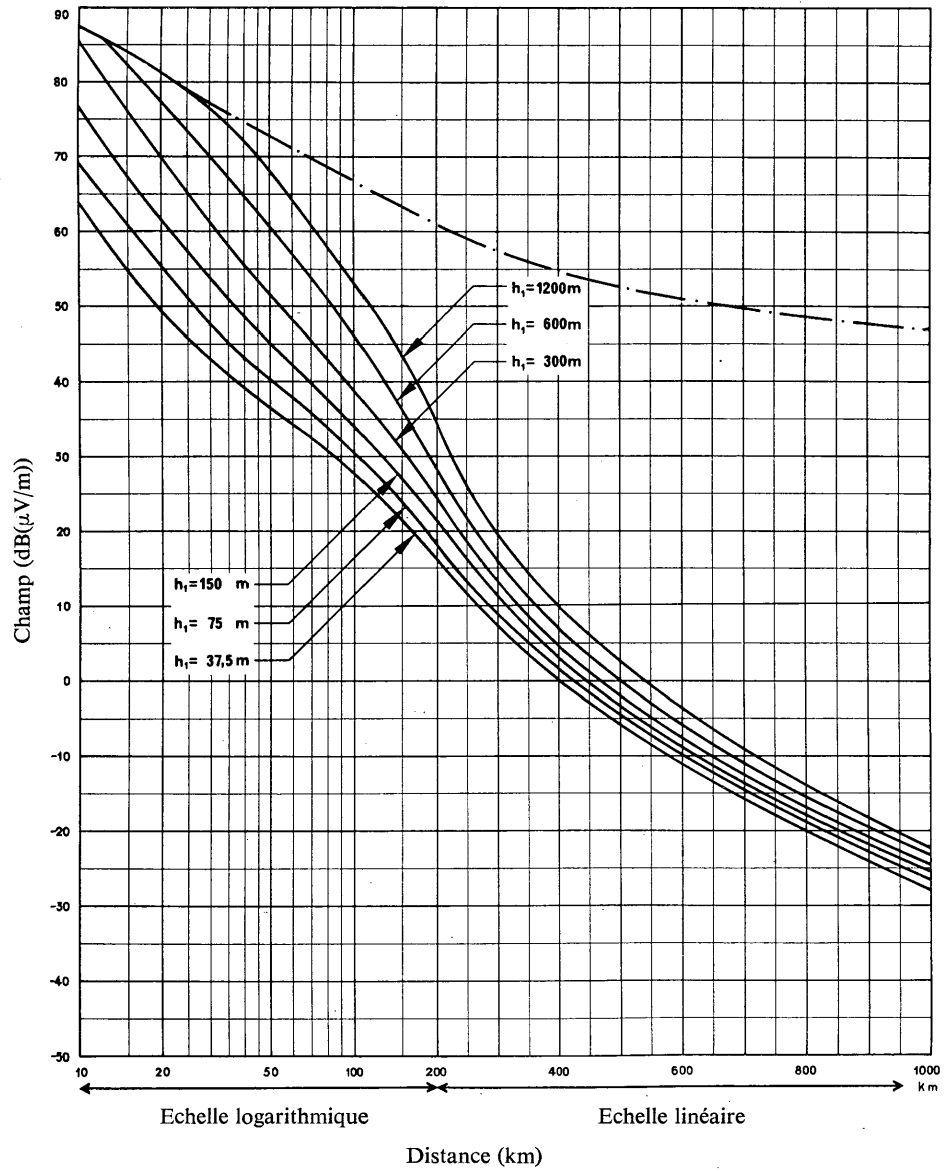


FIGURE 2b

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Terre et mer (région de la Méditerranée) —
10% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

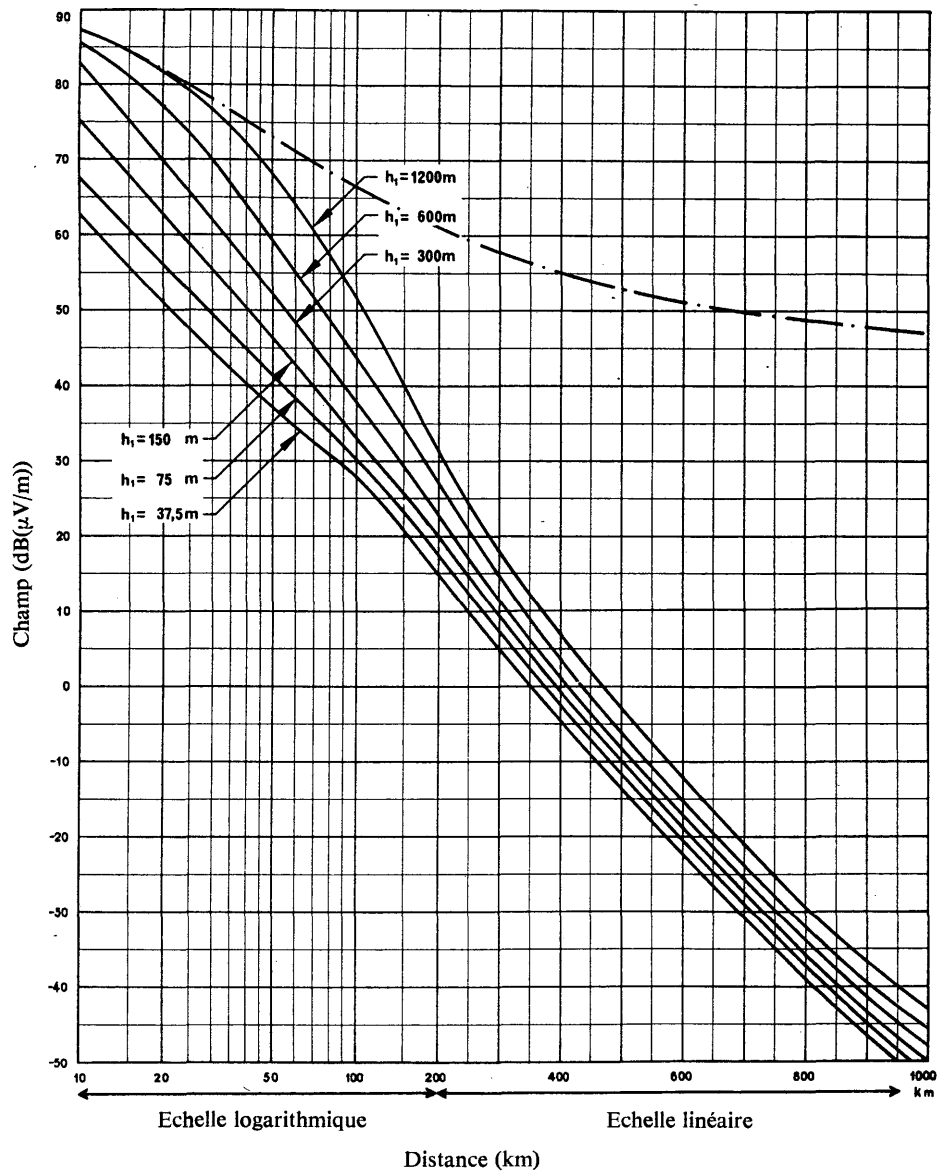


FIGURE 3a

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — mer du Nord —
5% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

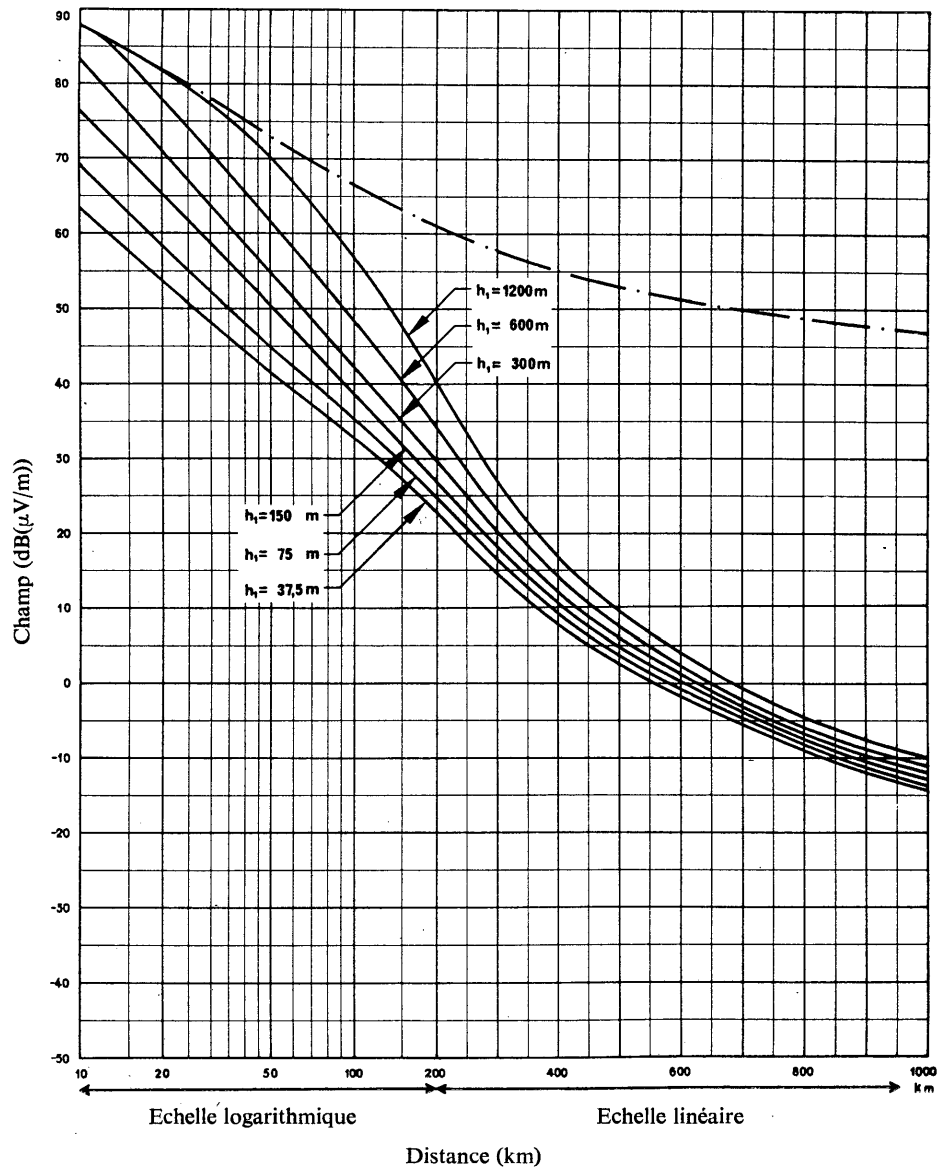


FIGURE 3b

Champ ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Méditerranée —
5% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

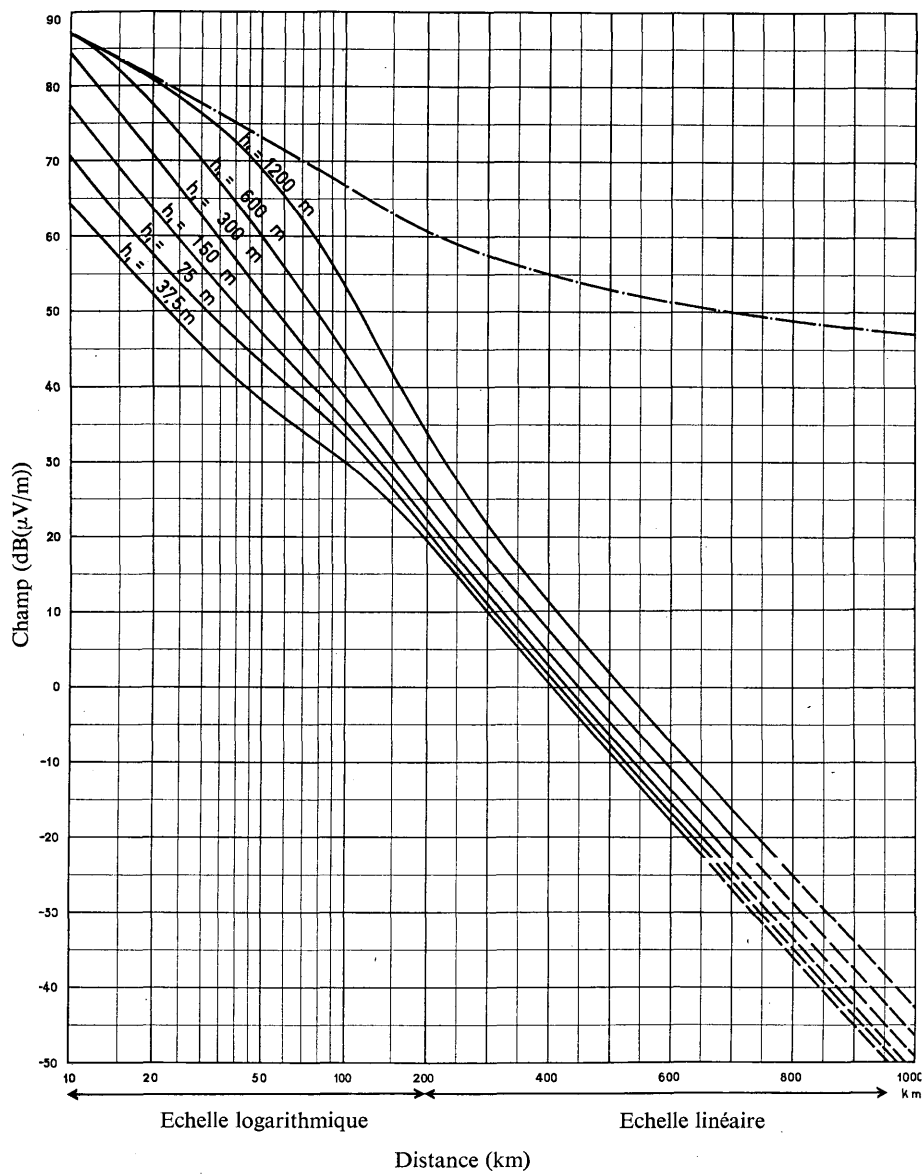


FIGURE 4a

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Terre — 1 % du temps —
50 % des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — · — Espace libre

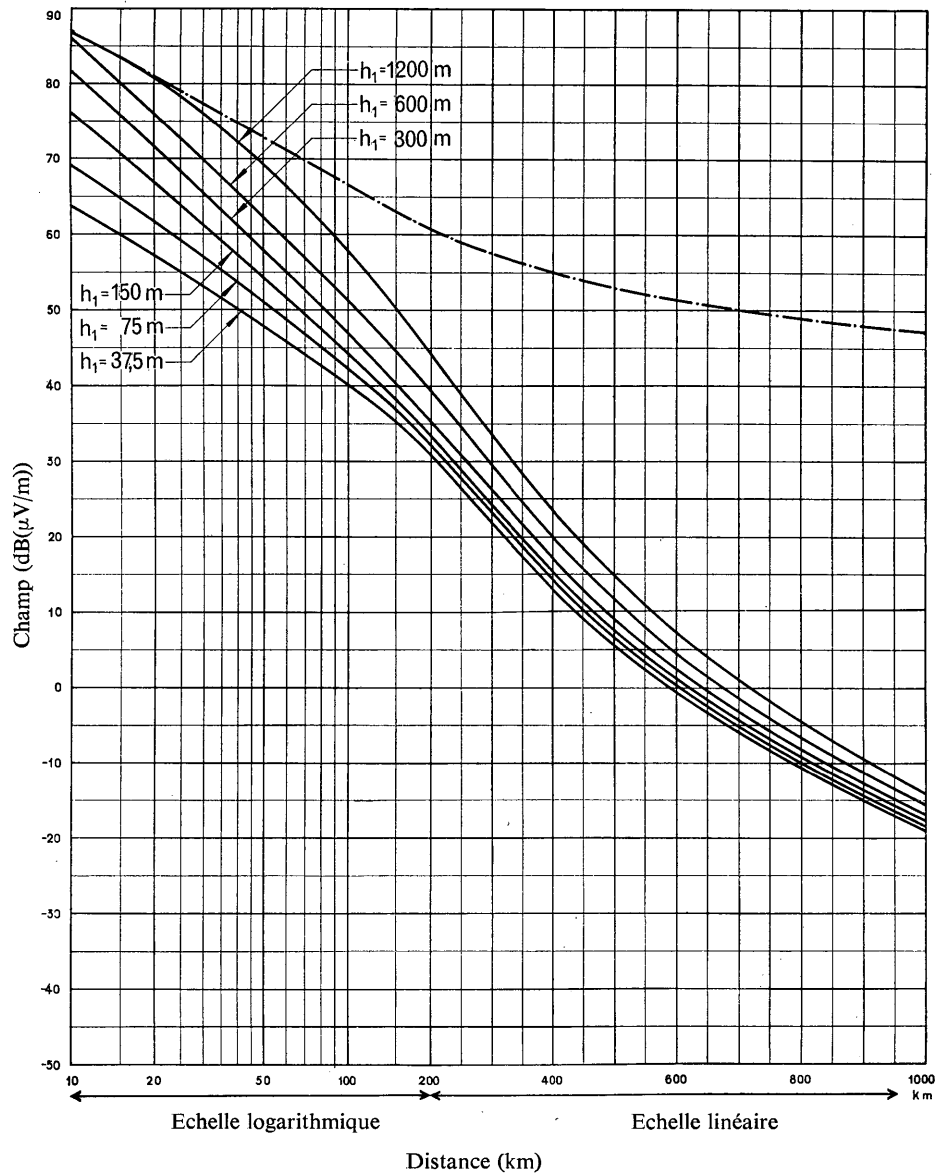


FIGURE 4b

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — mer du Nord — 1 % du temps —
50 % des emplacements — $h_2 = 10$ m

· - - - - Espace libre

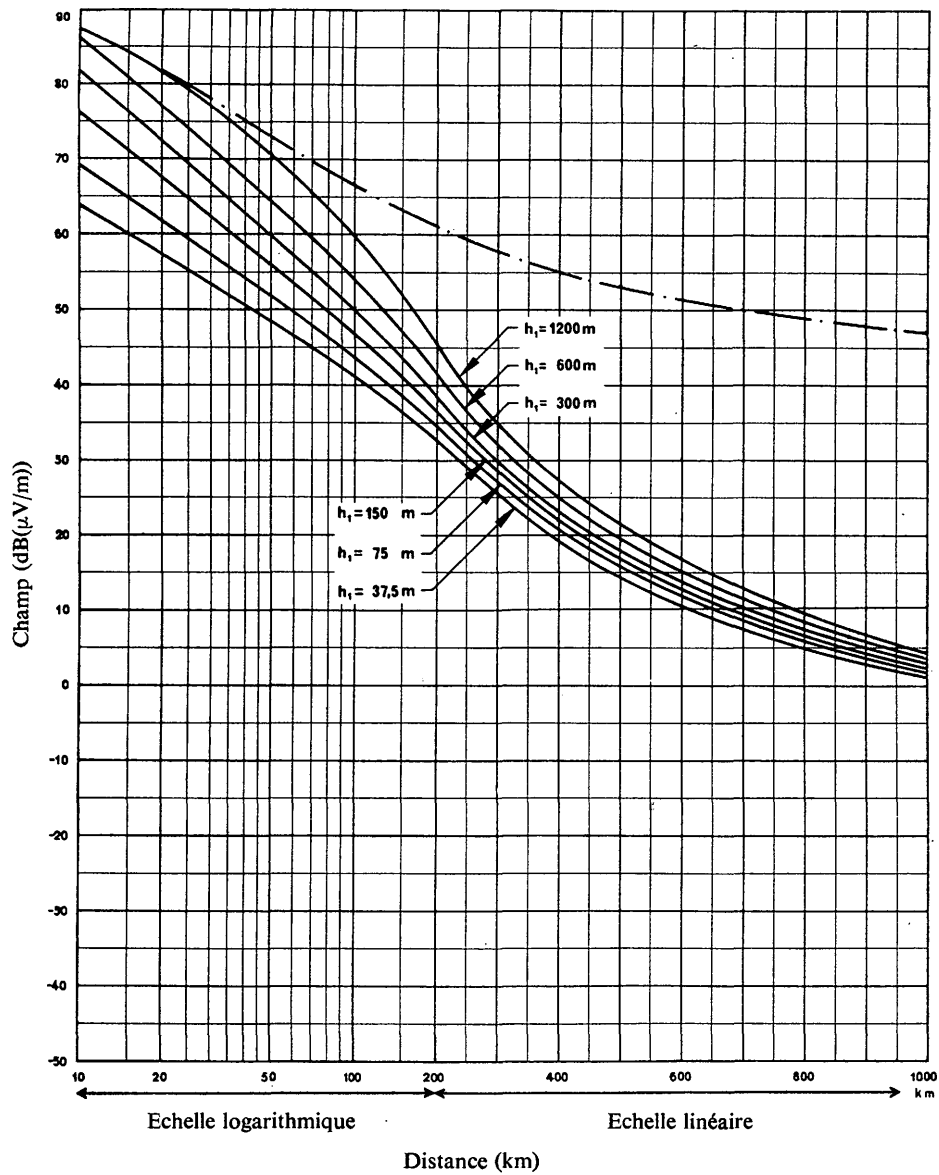


FIGURE 4c

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — Méditerranée —
1 % du temps — 50 % des emplacements — $h_2 = 10\text{ m}$

— · — · — · — Espace libre

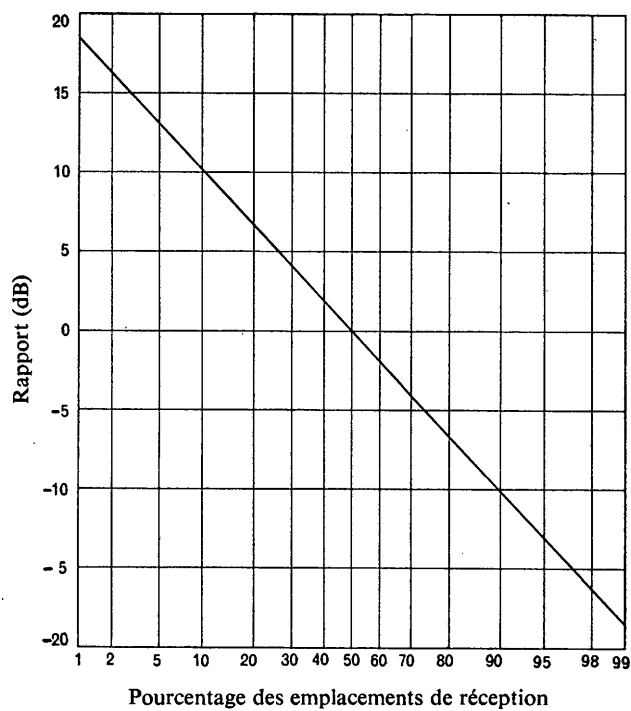


FIGURE 5

Rapport (dB) entre le champ pour un pourcentage quelconque des emplacements de réception et le champ pour 50% des emplacements de réception

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III)

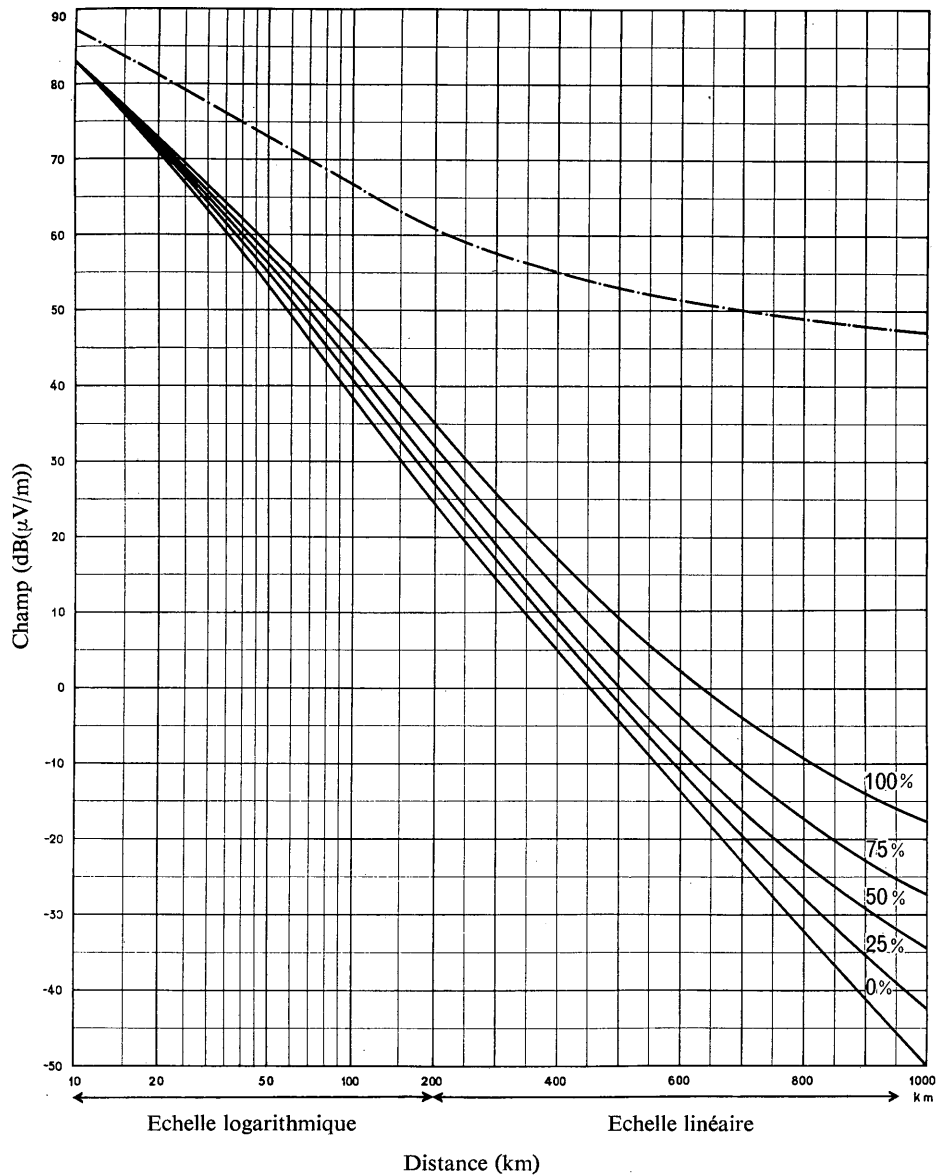


FIGURE 6

Champ ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — trajet mixte, terre et mer (mer du Nord) — 1% du temps —
 50% des emplacements — $h_2 = 10 \text{ m}$ — $h_1 = 300 \text{ m}$
 (Courbes les mieux adaptées au pourcentage indiqué de trajet maritime)

— · — · — · — Espace libre

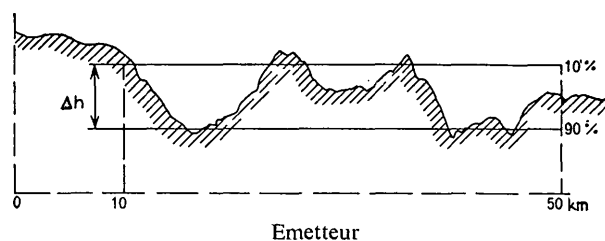


FIGURE 7

Définition du paramètre Δh

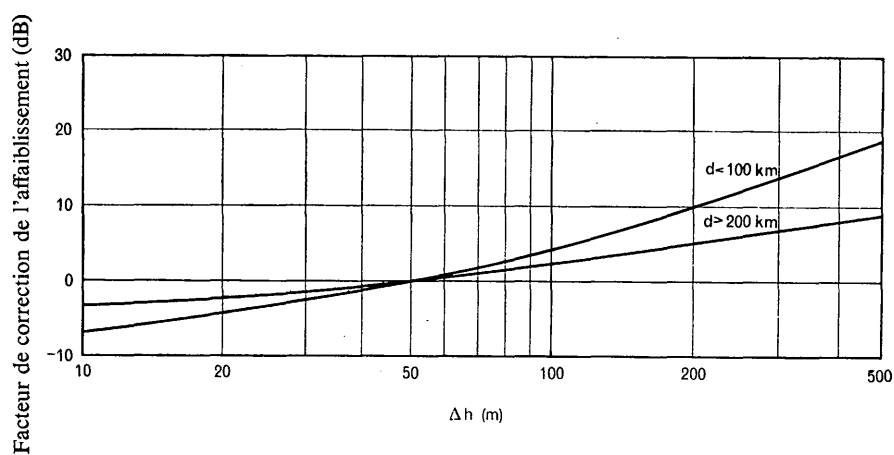


FIGURE 8a

Facteur de correction de l'affaiblissement, en fonction de Δh , pour des fréquences de 80 à 250 MHz
(Bandes II et III)

(d est la distance de l'émetteur)

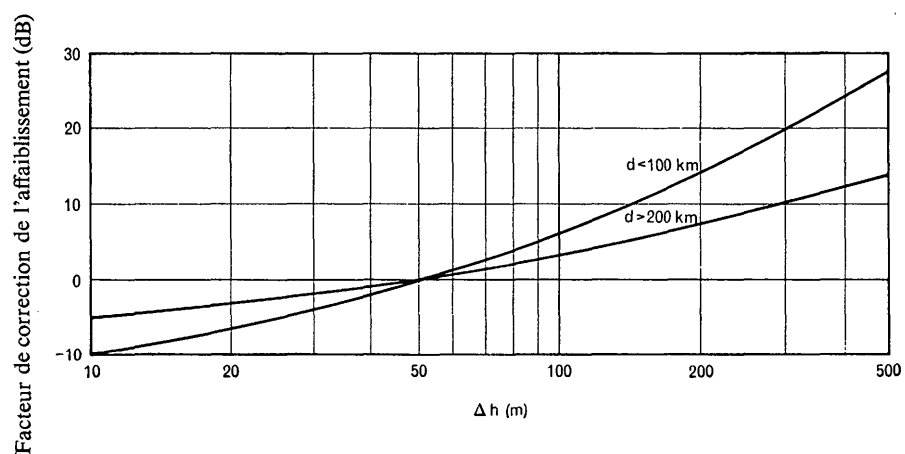


FIGURE 8b

Facteur de correction de l'affaiblissement, en fonction de Δh , pour des fréquences de 450 à 1000 MHz
(Bandes IV et V)

(d est la distance de l'émetteur)

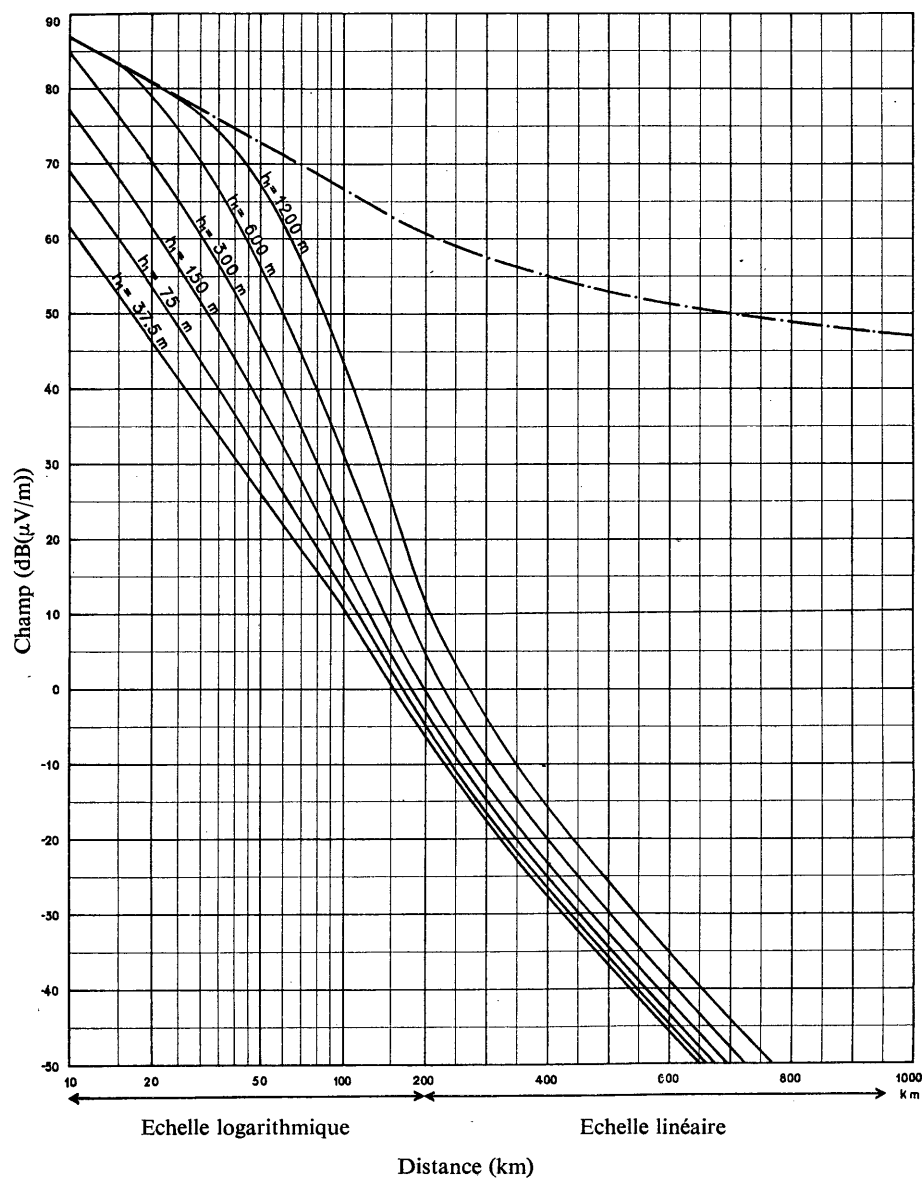


FIGURE 9

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — Terre — 50% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 10$ m — $\Delta h = 50$ m

— · — · — · — Espace libre

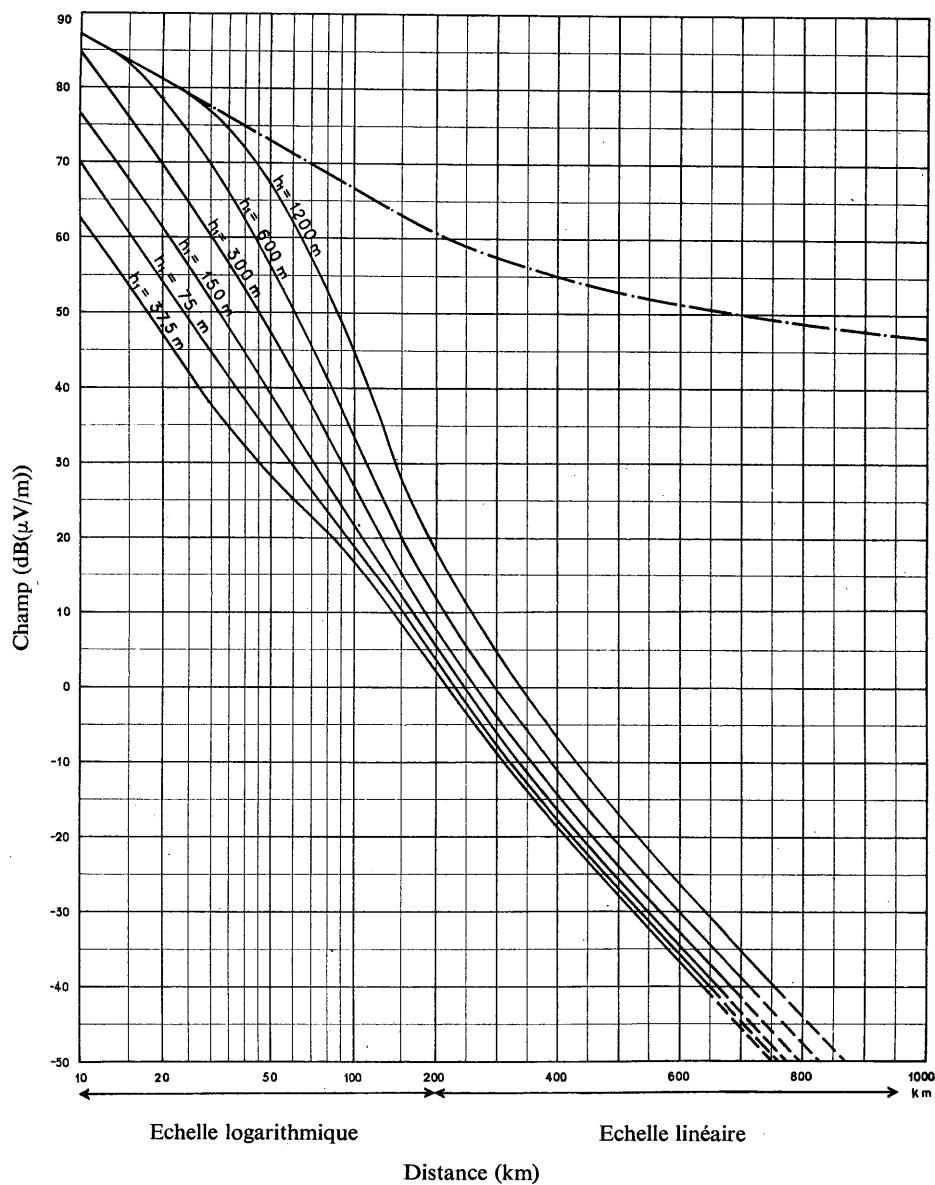


FIGURE 10

Chap (dB(μ V/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — Terre — 10% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 10$ m — $\Delta h = 50$ m

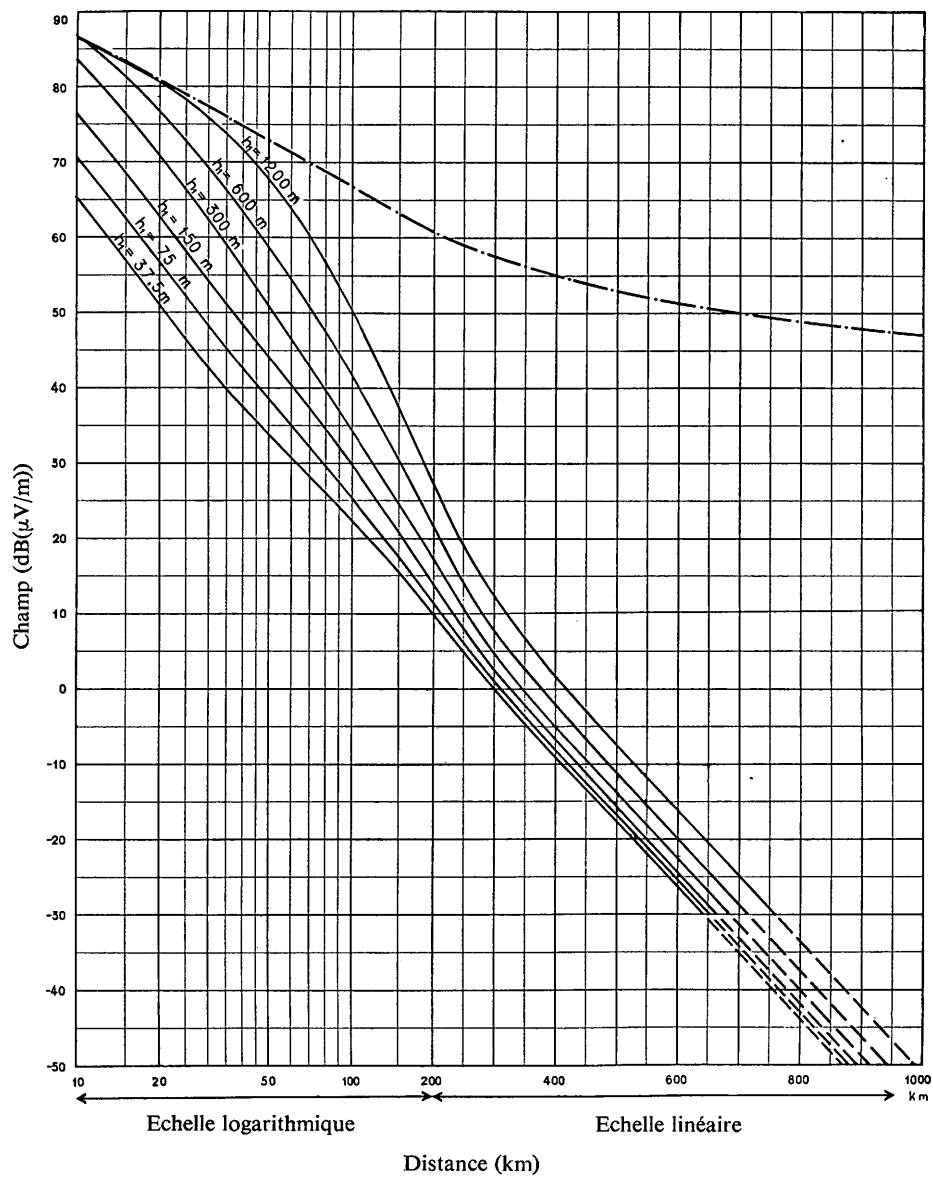


FIGURE 11

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — Terre — 1 % du temps —
50 % des emplacements — $h_2 = 10$ m — $\Delta h = 50$ m

— · — · — · Espace libre

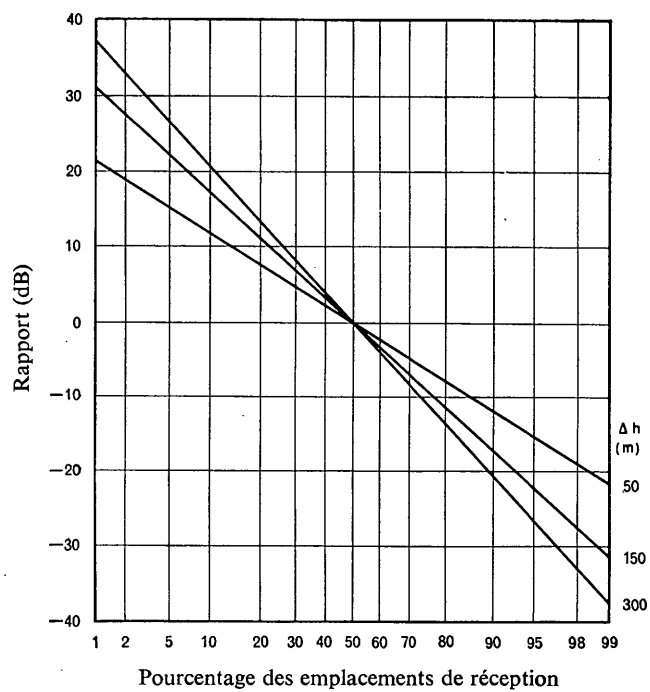


FIGURE 12

Rapport (dB) entre le champ pour un pourcentage quelconque des emplacements de réception et le champ pour 50% des emplacements de réception

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V)

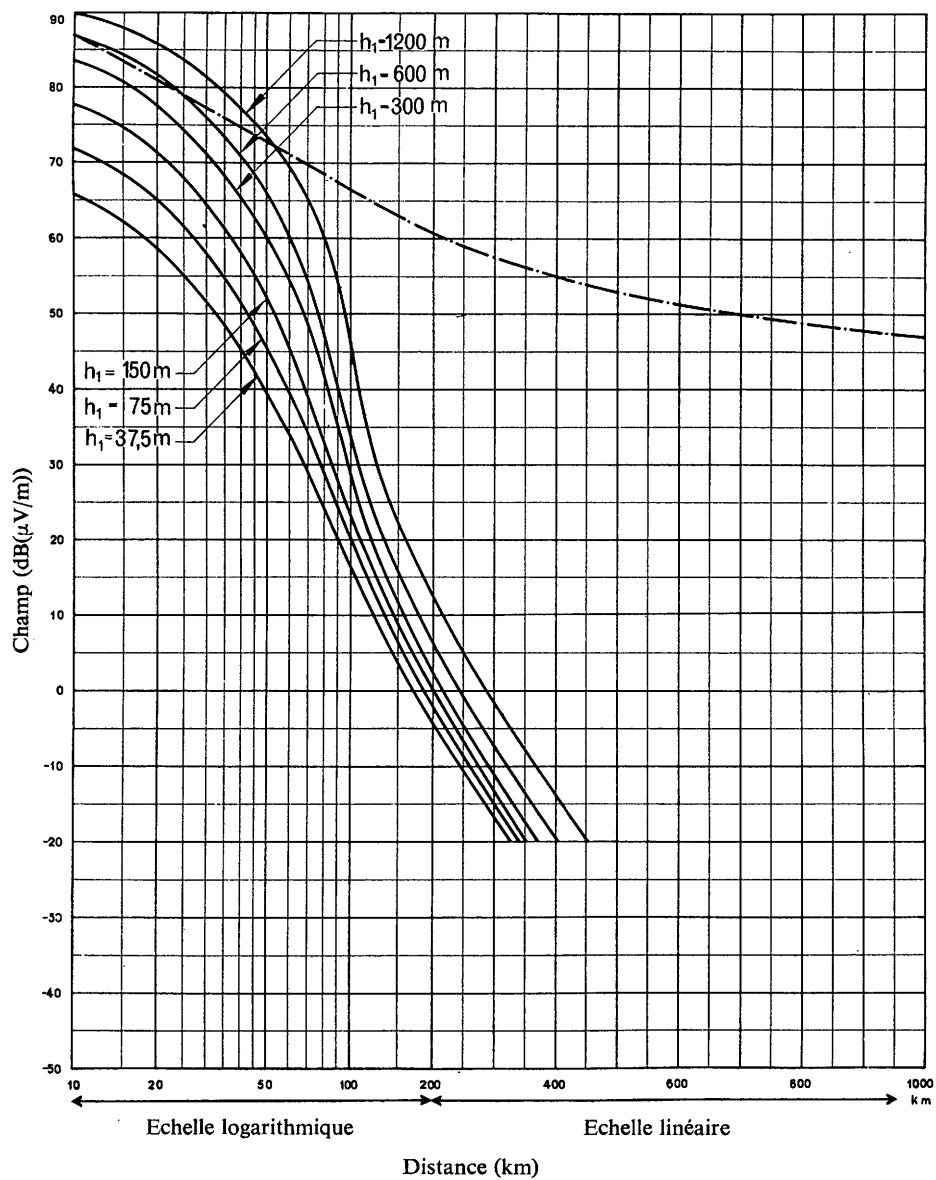


FIGURE 13

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer du Nord et Méditerranée —
50% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · Espace libre

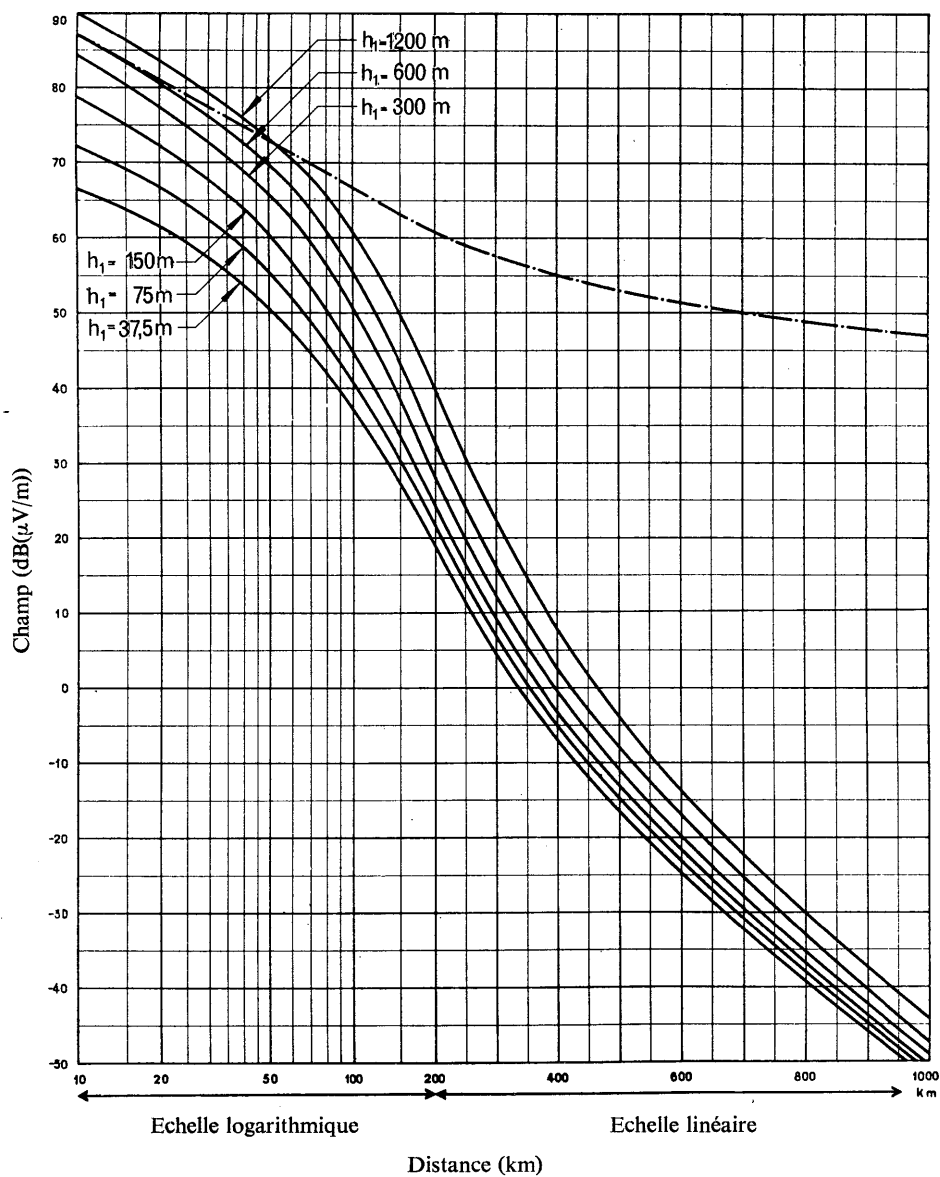


FIGURE 14a

Chap (dB(μ V/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer du Nord — 10% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

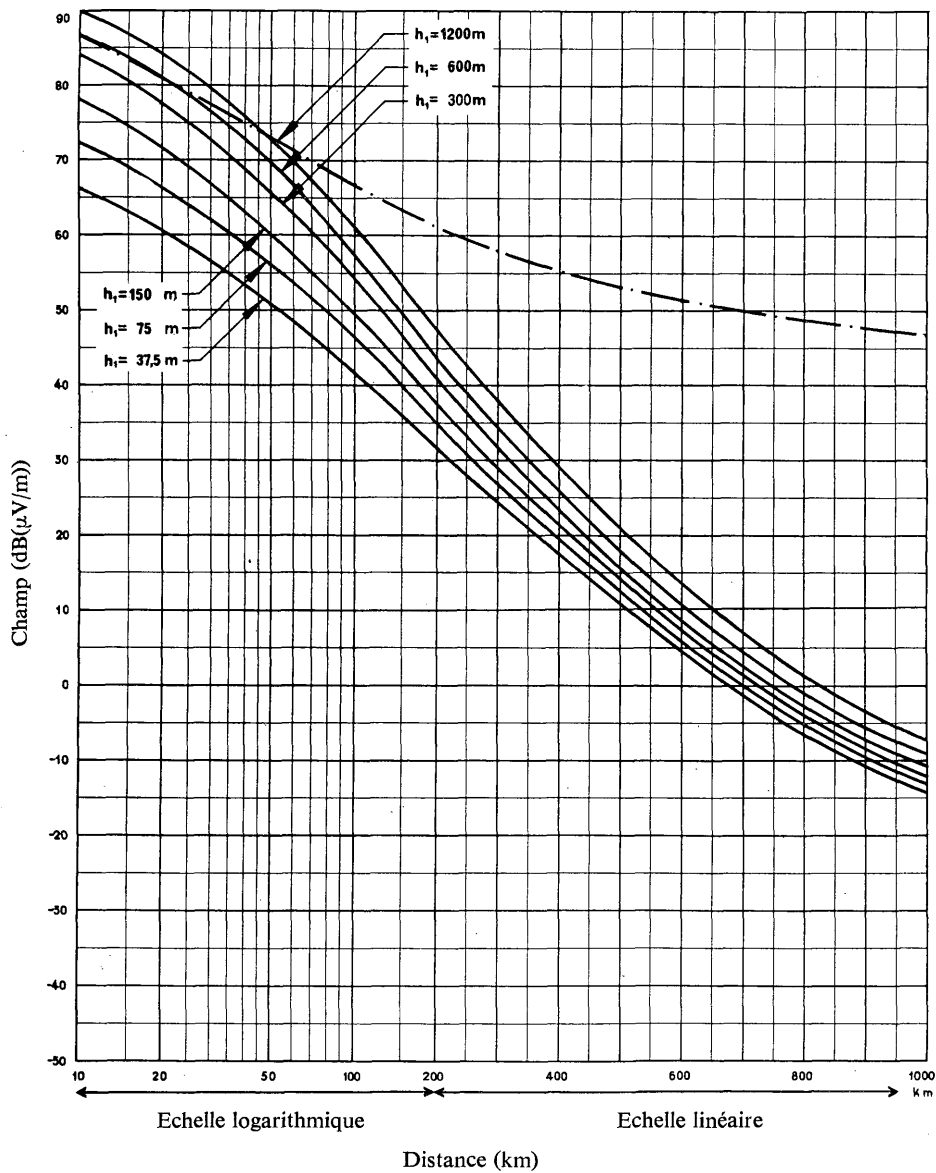


FIGURE 14b

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer Méditerranée — 10% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— Espace libre

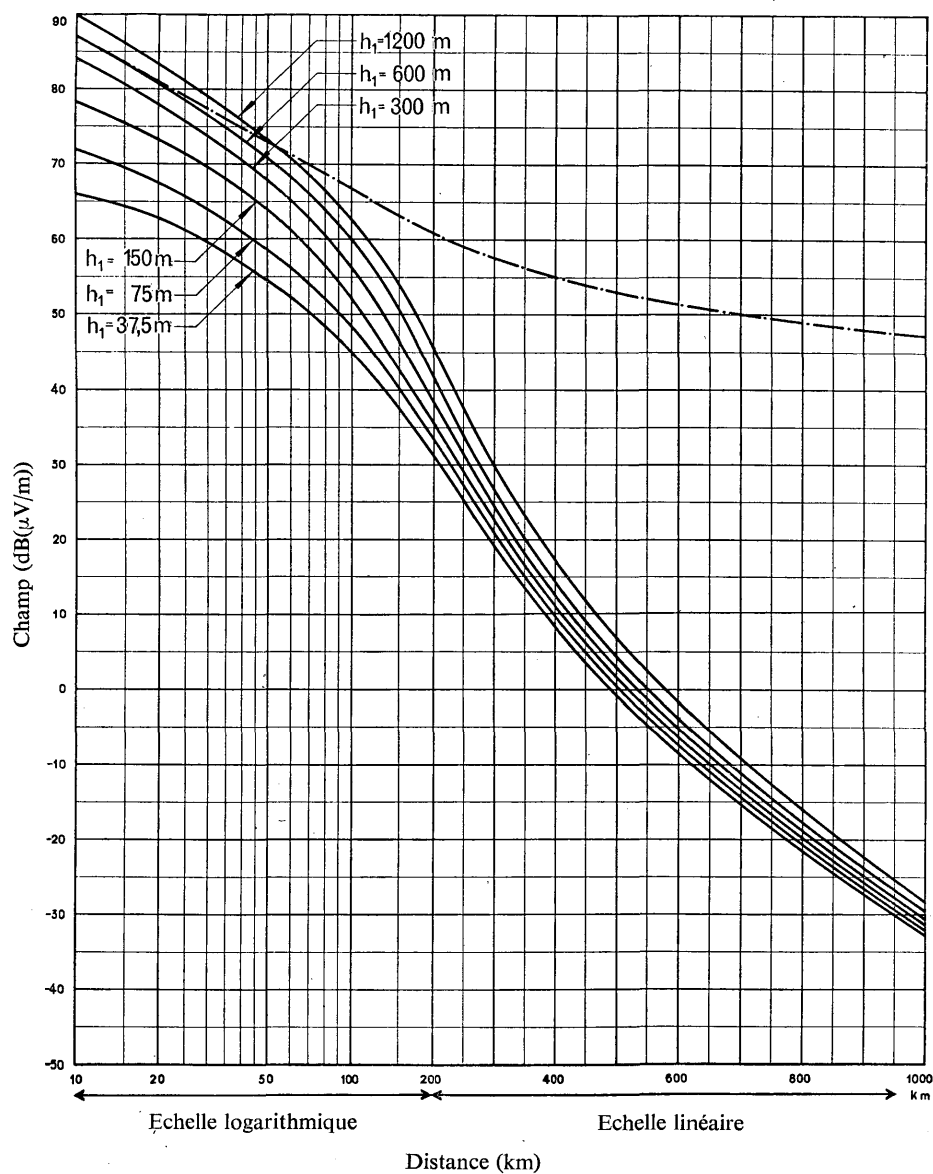


FIGURE 15a

Chap ($dB(\mu V/m)$) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer du Nord — 5% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · — Espace libre

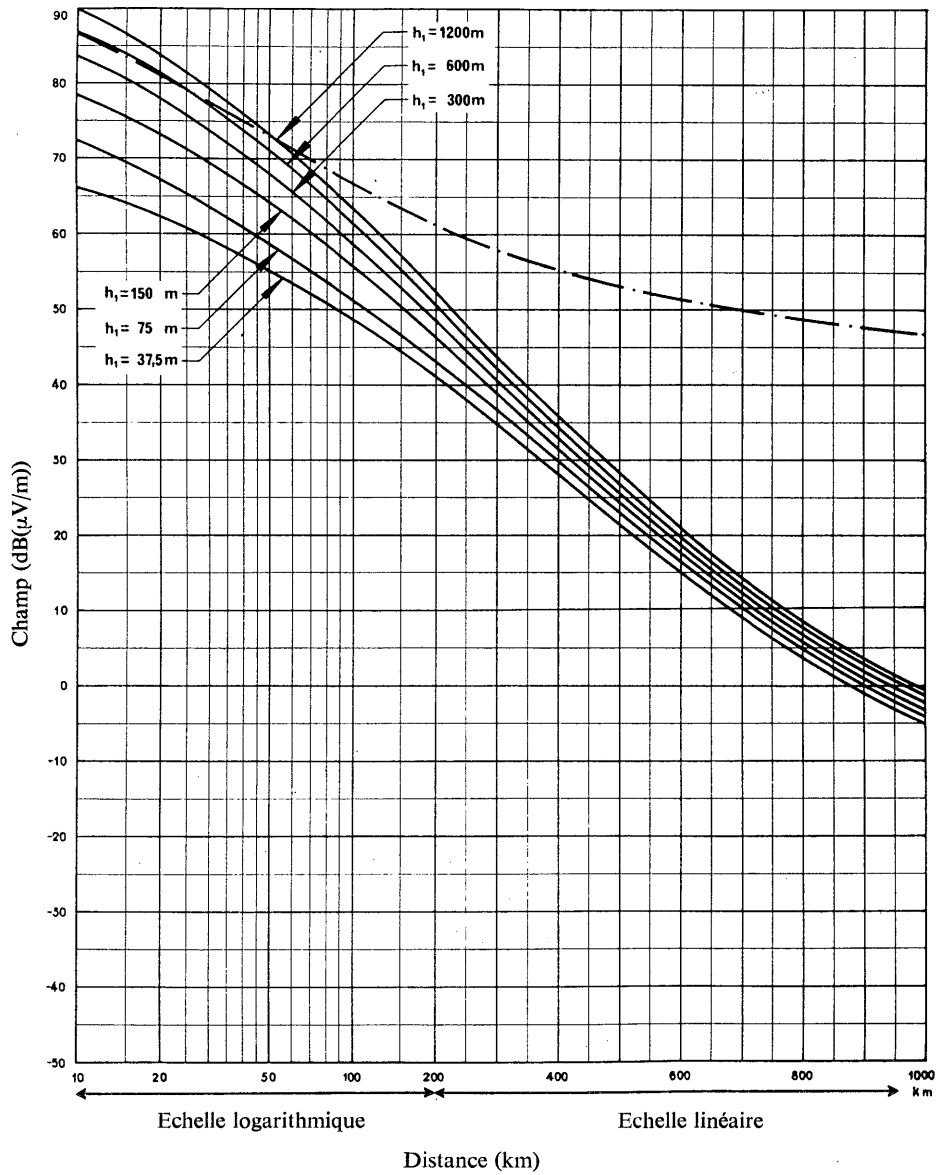


FIGURE 15b

Champ (dB(μ V/m)) pour 1kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer Méditerranée — 5% du temps —
50% des emplacements — h₂ = 10 m

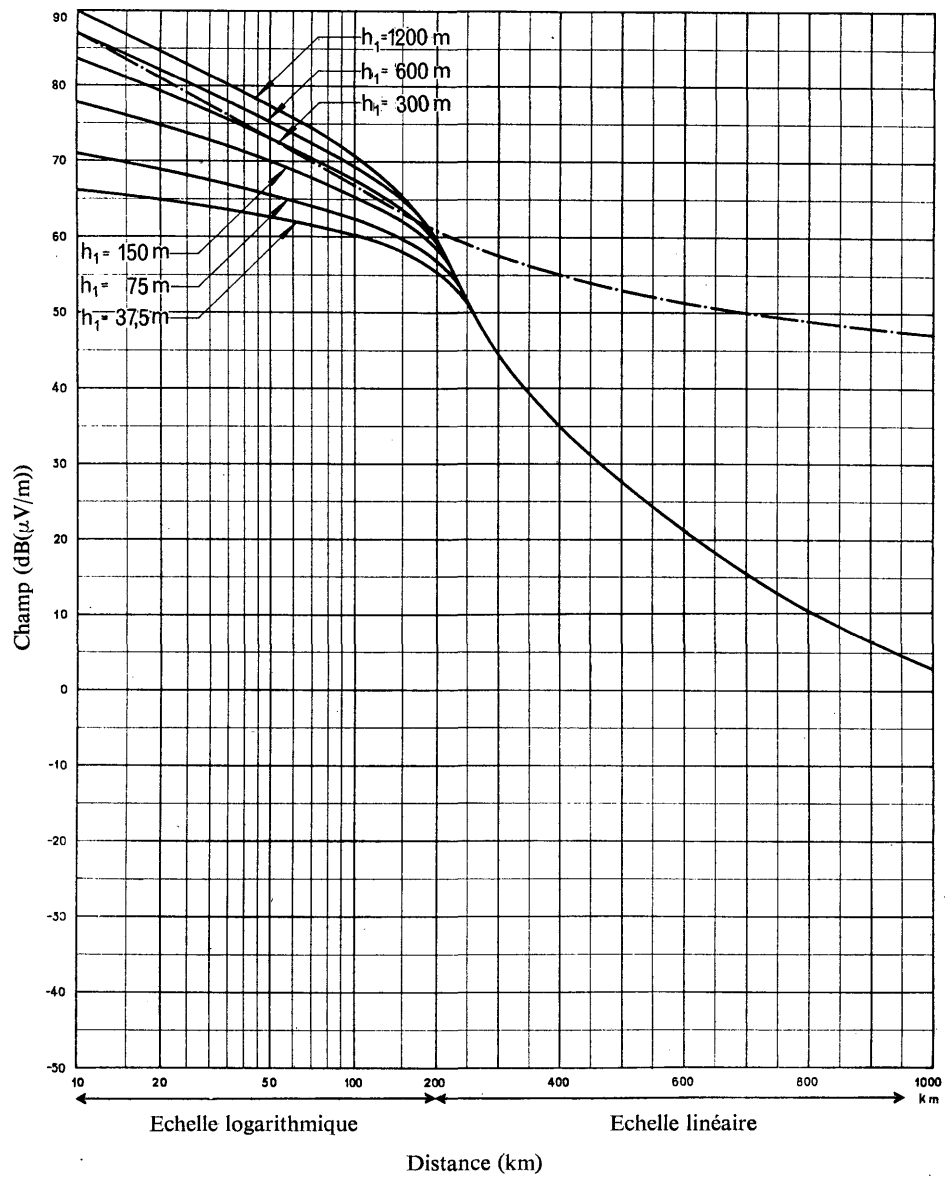


FIGURE 16a

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer du Nord — 1 % du temps —
50 % des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · Espace libre

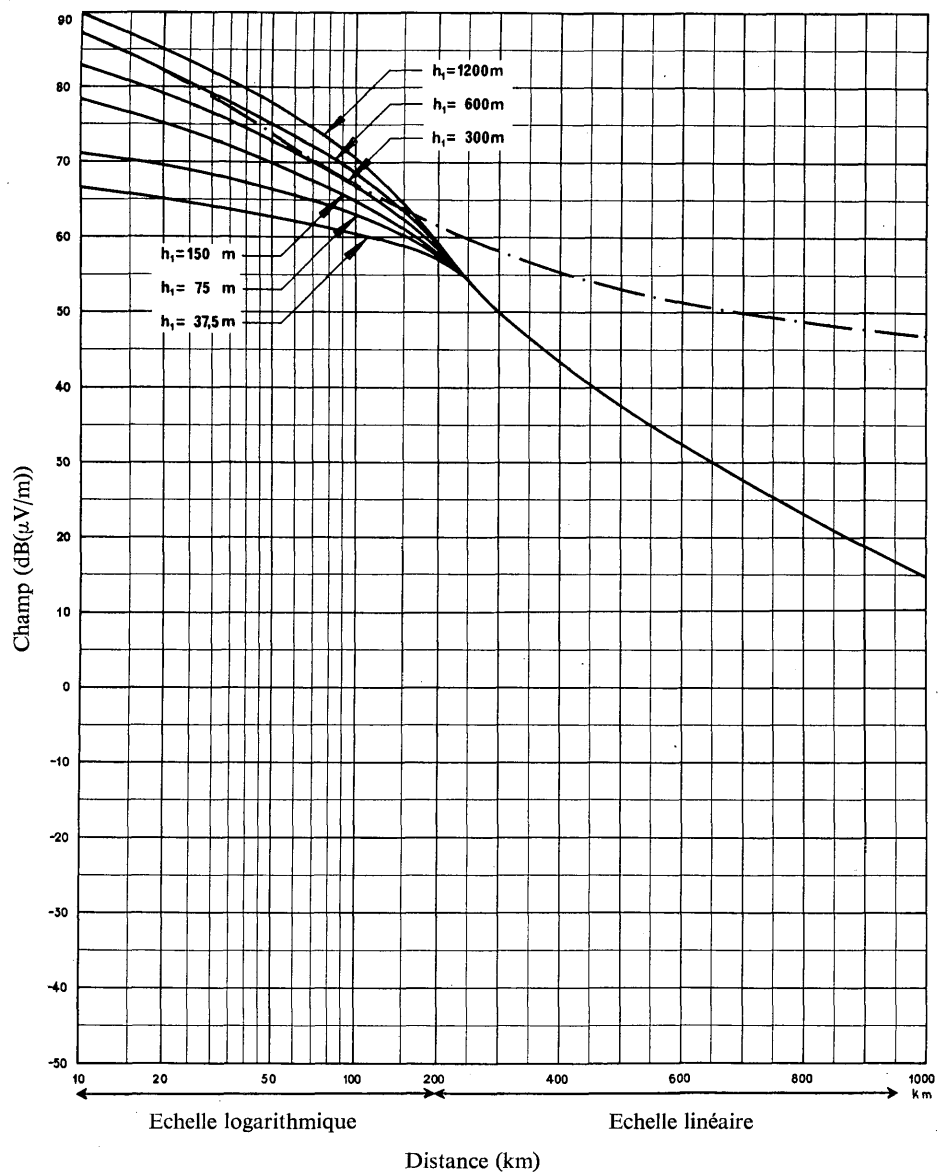


FIGURE 16b

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — mer Méditerranée —
1% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m

— · — · — · Espace libre

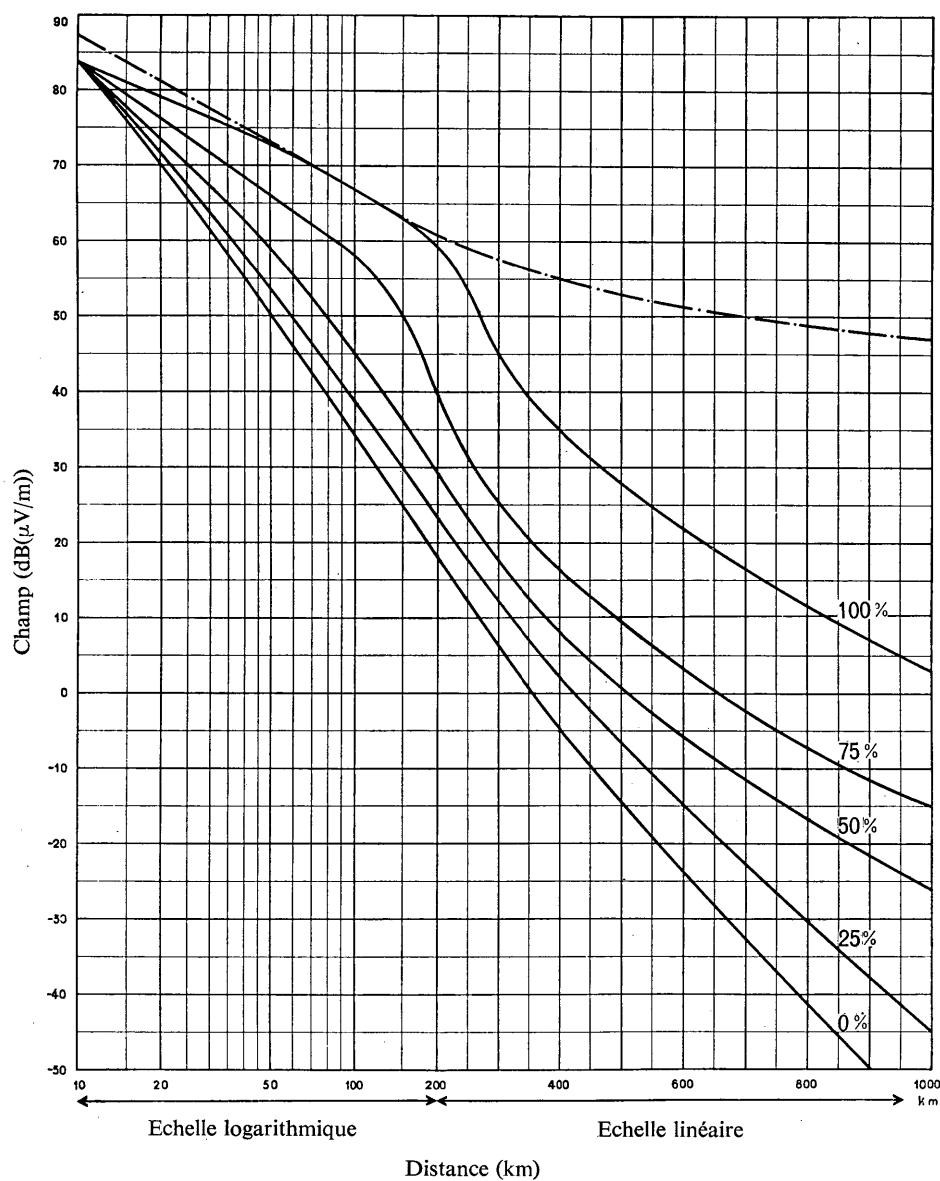


FIGURE 17a

Chap ($dB(\mu V/m)$) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — trajet mixte terre-mer (région de la mer du Nord) — 1% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m — $h_1 = 300$ m

(Courbes les mieux adaptées au pourcentage indiqué de trajet maritime)

— · — · — · — Espace libre

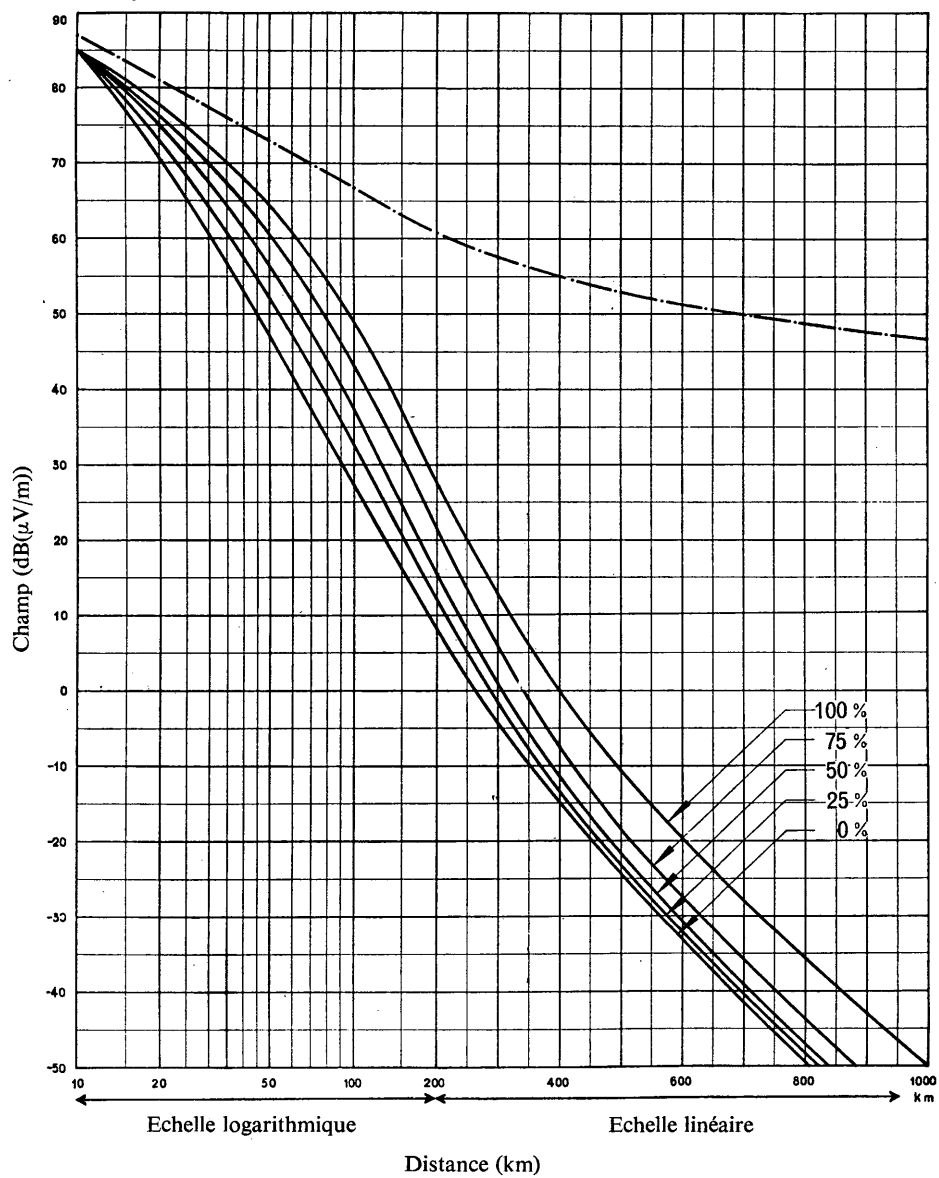


FIGURE 17b

Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — trajet mixte terre-mer (région de la mer du Nord) —
10% du temps — 50% des emplacements — $h_2 = 10$ m — $h_1 = 300$ m

(Courbes les mieux adaptées au pourcentage indiqué de trajet maritime)

— · — · — · Espace libre

5D: *Rapports*

RAPPORT 227-1 *

**MÉTHODES GÉNÉRALES DE MESURE DU CHAMP ET
DES PARAMÈTRES QUI S'Y RAPPORTENT**

(Question 7/5)

(1959 – 1963 – 1974)

1. Introduction

Le présent Rapport traite des méthodes générales de mesure du champ et d'autres paramètres qui s'y rapportent, comme la puissance surfacique, la puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception ou la puissance rayonnée. Les relations entre ces paramètres sont indiquées dans le Rapport 566.

2. Objectif des mesures

Le plus souvent, les mesures des paramètres ci-dessous sont effectuées en vue de l'un des objectifs suivants:

- 2.1 déterminer dans quelle mesure le signal radioélectrique est convenable pour un service donné;
- 2.2 déterminer les brouillages causés par une émission;
- 2.3 observer les phénomènes de propagation, les données d'observation étant utilisées, soit dans des études ayant trait aux télécommunications, soit dans l'étude d'autres phénomènes physiques;
- 2.4 contrôler l'intensité des rayonnements non désirés émis par des appareils qui produisent de l'énergie électromagnétique non destinée à transmettre des informations et vérifier le bon fonctionnement des dispositifs utilisés pour la suppression de ces rayonnements.

3. Antennes employées dans les mesures

On peut employer n'importe quel type d'antenne de réception pour mesurer le champ; cependant, pour les fréquences inférieures à 30 MHz environ, les mesureurs de champ sont équipés généralement de cadres ou de dipôles [Chapin; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949]. On travaille avec des cadres à structure symétrique et/ou blindés pour réduire l'influence du champ électrique. On a maintenant généralisé un procédé qui utilise un cadre dissymétrique muni d'un blindage électrique fendu à la partie supérieure. La plupart des cadres comportent plusieurs spires, mais dans certains appareils on trouve des cadres à une seule spire. Il n'est pas possible de réaliser des blindages qui protègent efficacement les antennes rectilignes de l'influence des champs magnétiques; dans la gamme de fréquences considérée, ces antennes sont normalement utilisées avec un montage dissymétrique, le reste de l'appareil et la source d'alimentation servant de masse.

On emploie généralement des dipôles demi-onde au-dessus de 30 MHz environ [Chapin; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949]; toutefois, dans certains appareils de mesure de champ portatifs, on emploie parfois ces éléments pour des fréquences pouvant descendre jusqu'à 18 MHz et même à des fréquences beaucoup plus basses dans le cas d'enregistrements du champ en des points fixes. A ces fréquences et sous une incidence au sol rasante, la propagation est normalement indépendante de la polarisation. Toutefois, pour certaines mesures de bruit et de brouillages [C.I.S.P.R.; ASA a; ASA b; CEI; AIEE, 1951; Proc. IRE, 1942], dans lesquelles on travaille à très courte distance, on utilise, en général, un collecteur d'onde spécial. Même alors, on se heurte à des complications liées à la décroissance rapide du champ aux petites distances. Les résultats de mesure obtenus selon cette méthode risquent de n'être pas représentatifs des valeurs réelles du champ à des distances plus grandes et il convient d'éviter, si possible, l'emploi de cette méthode, à moins qu'elle ne traduise fidèlement les conditions physiques rencontrées en pratique.

* Adopté à l'unanimité.

On obtiendra des résultats plus directement utilisables en mesurant la puissance disponible dans une antenne de réception de même type que celle du système radioélectrique étudié plutôt que dans une antenne de référence simple; le champ reçu est, en effet, souvent tellement complexe qu'il est extrêmement difficile de calculer le comportement du système réel d'après des mesures de champ effectuées avec des dipôles simples.

Pour la mesure des champs électromagnétiques de faible intensité, on peut être amené à utiliser des systèmes d'antennes directives.

4. Influence des conditions locales sur les mesures

D'une manière générale, il faudrait mesurer le champ ou la puissance disponible en plaçant l'antenne de réception à l'emplacement même où elle sera utilisée dans les conditions réelles. Le comportement d'un système de radiodiffusion est affecté d'une façon appréciable par la présence d'arbres, de bâtiments, de fils aériens, etc., et il importe de tenir compte de telles conditions locales lors des mesures. Le meilleur procédé pour évaluer le comportement d'un système de radiodiffusion consiste à faire des mesures en une série d'emplacements de réception choisis systématiquement selon la méthode décrite dans le Rapport 228-1.

Toutefois, dans le cas particulier des mesures de champ ayant pour objet de déterminer la puissance rayonnée par une antenne d'émission ou la directivité d'une telle antenne, il est souhaitable de choisir avec soin des points de mesure où les influences locales perturbatrices ont un effet minimal sur les résultats; moyennant cela, on peut déterminer avec plus de précision l'affaiblissement de transmission ou le champ inversement proportionnel à la distance.

Les considérations suivantes doivent régir le choix des emplacements de mesure:

- 4.1 les champs radioélectriques en ondes métriques et décimétriques peuvent être déformés par des poteaux en bois ou par d'autres diélectriques aussi bien que par des conducteurs. Si l'émetteur ou le récepteur est logé dans un bâtiment pour être à l'abri des intempéries, il est préférable que ce bâtiment soit construit avec des matériaux ayant une faible constante diélectrique et n'absorbant pas l'eau. Certaines matières plastiques ont donné de bons résultats à cet égard. Il convient, si possible, de faire les mesures avec et sans bâtiment, ce qui permet de déterminer son influence sur les résultats. Si l'appareil de mesure de champ est logé dans un bâtiment, on s'arrangera pour que les extrémités des antennes de réception soient aussi éloignées que possible des parois;
- 4.2 quelle que soit la fréquence, il faut tenir compte de l'influence des fils, des câbles et de tous autres conducteurs aériens. Dans les régions où le sol a une conductivité élevée, il faut que l'antenne de réception soit éloignée de ces éléments perturbateurs d'une distance au moins égale à plusieurs fois la hauteur de ces éléments; cette distance doit être encore plus grande là où la conductivité du sol est faible. Lorsqu'on utilise un cadre comme antenne de réception, il est souvent possible de se rendre compte de ces influences perturbatrices par l'observation de la direction d'arrivée des signaux ou par le fait que l'on constate la présence de zéros assez flous dans le diagramme de directivité. Si l'on a à repérer les zéros dans un diagramme de rayonnement, on pourra être amené à prendre des précautions spéciales; en effet, une ligne à haute tension ou une ligne de communication de grande longueur peut conduire de l'énergie jusque dans la région du zéro où l'on effectue les mesures;
- 4.3 d'une manière générale, on n'a pas à tenir compte des perturbations dues aux câbles souterrains, pour autant que la fréquence soit supérieure à quelques MHz; en revanche pour les fréquences très inférieures à 2 MHz, des erreurs notables peuvent s'introduire dans les résultats de mesures de champ faites au voisinage de ces câbles, même si ces derniers sont enterrés à une profondeur de quelques mètres. On évitera tout particulièrement les câbles souterrains de très grande longueur (ou les câbles de jonction à des lignes aériennes). Heureusement, les champs perturbateurs sont, le plus souvent, des champs d'induction et il est possible de déterminer l'influence des câbles en faisant des mesures en un certain nombre de points situés à des distances différentes des câbles, pour déterminer le taux d'affaiblissement du champ. Ces câbles peuvent être extrêmement gênants dans les régions où la conductivité du sol est très mauvaise et leurs effets peuvent être encore compliqués par des effets de directivité;
- 4.4 les caractéristiques du sol peuvent, elles aussi, avoir une grande influence sur les champs à polarisation verticale en ondes métriques et décimétriques. Si l'antenne d'émission et celle du mesureur de champ sont horizontales et placées au voisinage immédiat du sol et que l'on élève l'une d'entre elles, on observe une augmentation quasi linéaire du champ avec la hauteur, jusqu'à un certain maximum, après lequel on a une variation périodique du champ en fonction de la hauteur. Avec les antennes à polarisation verticale, le champ reste sensiblement constant jusqu'à une certaine hauteur au-delà de laquelle il subit des variations périodiques. La gamme de hauteur dans laquelle le champ peut être considéré constant

varie sensiblement comme l'inverse de la fréquence et proportionnellement à la constante diélectrique (sauf si la conductivité est élevée comme dans le cas de l'eau de mer). Supposons, par exemple, que l'on ait affaire à un champ polarisé verticalement, à la fréquence de 40 MHz, au-dessous de 5 mètres environ, ce champ est sensiblement indépendant de la hauteur au-dessus d'un sol normal; pourtant, des mesures effectuées au-dessus d'une nappe d'eau douce montrent qu'un tel champ demeure constant jusqu'à une hauteur beaucoup plus grande. On risque de faire de grossières erreurs d'interprétation si l'on néglige de tenir compte de ce phénomène;

- 4.5 les effets perturbateurs peuvent varier selon les types d'appareils; c'est ainsi que les déplacements de l'opérateur autour du mesureur de champ ont peu d'influence sur les résultats si l'appareil est muni d'une antenne à cadre, mais cette influence peut être importante si l'appareil est muni d'une antenne rectiligne;
- 4.6 on montrera dans l'annexe qu'il est préférable, dans certains cas, de mesurer le champ ou l'affaiblissement de propagation plutôt que l'affaiblissement de transmission, car ces paramètres subissent moins fortement l'influence des conditions locales telles que, par exemple, la hauteur de l'antenne de réception.

5. Effet de polarisation

Aux fréquences basses, on s'intéresse presque exclusivement aux ondes polarisées verticalement, sauf pour la réception de l'onde d'espace, pour laquelle il est possible d'utiliser la polarisation horizontale. En ce qui concerne l'onde de sol, celle-ci conserve la même polarisation qu'à l'émission, abstraction faite d'une certaine inclinaison du front de l'onde. Toutefois, en cas de réflexions ionosphériques, le signal reçu présente une polarisation mixte verticale et horizontale [Smith, 1945] sauf pour certaines fréquences et à certaines distances critiques. C'est pourquoi un appareil de mesure de champ à cadre ne peut pas donner les indications de directivité habituelles lorsqu'il reçoit une onde d'espace ayant subi des réflexions ionosphériques.

Aux fréquences supérieures à 30 MHz environ, les deux polarisations peuvent être utilisées pour la transmission, étant donné que les antennes sont placées à une hauteur au-dessus du sol qui est égale à une fraction appréciable de la longueur d'onde et que l'absorption de la composante horizontale par le sol n'est pas importante. La polarisation est à peu de chose près la même si les ondes se propagent sur de grandes distances en passant par la troposphère ou si elles parcourent de petites distances au-dessus du sol. Cependant, les conducteurs et les autres objets situés près de l'émetteur ou du récepteur sont susceptibles d'absorber une des polarisations et de rayonner ou de diffuser une fraction notable de l'autre polarisation. De nombreuses sources peuvent rayonner les deux polarisations. De plus, les harmoniques et les autres rayonnements non essentiels peuvent avoir une polarisation différente de celle de l'onde fondamentale et, d'autre part, leurs maxima et leurs minima peuvent ne pas coïncider avec les maxima et les minima de la fondamentale.

6. Unités employées dans les mesures

On emploie le plus souvent, dans les mesures de champ, le volt par mètre ou des sous-multiples convenables de cette unité. En toute rigueur, cette unité s'applique uniquement à la composante électrique du champ, mais on l'emploie aussi d'une manière générale pour la mesure de la composante magnétique, en particulier dans le cas des champs rayonnés en espace libre, pour lesquels les énergies des deux composantes sont les mêmes. Pour les fréquences supérieures à 1000 MHz, on peut aussi mesurer la densité du flux de puissance en watts (ou en sous-multiples du watt) par mètre carré.

Si les signaux mesurés ont une largeur de bande plus grande que celle de l'appareil de mesure de champ, il faut tenir compte de l'influence de ce facteur sur les mesures. Si l'on a affaire à un bruit impulsif dont les impulsions sont très espacées et réparties uniformément dans la portion considérée du spectre, la tension de crête sera directement proportionnelle à la largeur de bande, ce qui conduit à définir l'unité suivante: microvolt/mètre/kHz (ou microvolt/mètre dans une bande large de 1 kHz) [C.I.S.P.R.; ASA b]. La notion d'affaiblissement de transmission est très utile pour l'étude de certains systèmes et de certains modes de propagation [Norton, 1953 et 1959]. On définit l'affaiblissement de transmission par le rapport, exprimé en décibels, entre la puissance à l'entrée de l'antenne d'émission et la puissance disponible à la sortie de l'antenne de réception. L'unité employée est alors le décibel.

7. Précision et reproductibilité des mesures

On verra, d'après l'exposé en annexe, que pour mesurer l'une quelconque des grandeurs considérées ici, il faut déterminer à la fois la tension en circuit ouvert aux bornes de l'antenne de réception et l'une des deux grandeurs suivantes: la hauteur effective ou la résistance de rayonnement. La précision avec laquelle on détermine ces deux dernières grandeurs dépend du type d'antenne et surtout des influences locales qui s'exercent autour de l'antenne; toutefois, dans des conditions idéales, les erreurs correspondantes devraient être négligeables devant l'erreur qui entache la mesure de la tension en circuit ouvert. La précision absolue réalisable dans la mesure de la tension en circuit ouvert est probablement un peu meilleure que les valeurs indiquées dans le Tableau I.

TABLEAU I

Bande de fréquences	Précision des mesures ($\pm$ dB)	Champ minimal pour lequel on obtient cette précision (μ V/m)
10 - 30 kHz	2	10 ⁽¹⁾
30 - 300 kHz	2	5 ⁽¹⁾
300 - 3000 kHz	2	2 ⁽¹⁾
3 - 30 MHz	2	2 ⁽¹⁾
30 - 300 MHz	2	2
300 - 3000 MHz	3	5 ⁽²⁾
3 - 30 GHz	5	10 ⁽²⁾

(¹) Les valeurs minimales sont légèrement plus élevées pour des mesureurs de champ équipés d'antennes à cadre.

(²) 1 μ V/m correspond à $2,7 \cdot 10^{-15}$ W/m².

A noter cependant que, dans les conditions de travail particulières qui sont celles des stations de contrôle, il devrait être possible d'améliorer quelque peu la précision pour des minima beaucoup plus faibles du champ. L'Avis 378-1 indique les conditions qui sont alors requises. Lorsqu'on mesure des bruits et des brouillages de caractère impulsif, on peut généralement tolérer une précision moins bonne [C.I.S.P.R.; ASA b; AIEE, 1951].

En général, la précision relative ou la reproductibilité des mesures sont sensiblement meilleures que leur précision absolue, à condition que la source de rayonnement sur laquelle portent les mesures demeure stable. Il existe toutefois des rayonnements qui varient sensiblement en fonction du temps, par exemple les rayonnements non essentiels des générateurs de signaux, les harmoniques et les ondes parasites des émetteurs, les rayonnements des oscillateurs des récepteurs, le rayonnement d'une antenne directive dans un zéro du diagramme, etc.; ces rayonnements peuvent donner lieu à des erreurs apparentes de mesure, mais il s'agit simplement, en réalité, d'un manque de stabilité de la grandeur que l'on mesure.

8. Circuits de l'appareil de mesure de champ [C.I.S.P.R.; ASA a; Chapin]

La tension qui attaque l'appareil de mesure de champ peut être comprise entre une fraction de microvolt et plusieurs volts; l'appareil doit être conçu de telle sorte que les phénomènes de surcharge et d'intermodulation se produisant dans ses premiers étages ne provoquent pas d'erreur. Les mesureurs de champ comportent généralement au moins un circuit accordé avant le premier tube et un affaiblisseur à fréquence radioélectrique, suivi d'un mélangeur et d'un amplificateur à fréquence intermédiaire ayant un gain et une largeur de bande convenables. L'étage d'amplification à fréquence intermédiaire (FI) peut être précédé d'un affaiblisseur à fréquence intermédiaire (FI) étalonné, mais on obtient parfois l'affaiblissement nécessaire en agissant simplement sur la tension de polarisation des tubes de l'étage à fréquence intermédiaire. L'amplificateur à fréquence intermédiaire commande le détecteur et le circuit de mesure. Dans certains cas, on peut accélérer les mesures par l'emploi de relais coaxiaux qui déclenchent les circuits de mesure à des valeurs prédéterminées.

Pour de nombreux mesureurs de champ, la caractéristique tension d'entrée/tension de sortie a une allure sensiblement logarithmique, ce qui est très utile pour la mesure ou l'enregistrement des évanouissements, etc. On obtient cette caractéristique, soit par l'emploi de pièces polaires profilées dans l'appareil à cadran, soit plus souvent par l'emploi d'une commande automatique de gain de conception convenable dans l'amplificateur à fréquence intermédiaire.

9. Procédés d'auto-étalonnage pour les appareils

Dans un petit nombre d'appareils, on se contente d'une certaine stabilité inhérente à la construction, sans prévoir par la suite un auto-étalonnage. Pour contrôler ces appareils, on peut relever l'indication fournie par le bruit des tubes. Cette méthode n'est pas très satisfaisante, vu l'état actuel de la technique, à moins que l'on ne dispose de générateurs de signaux pour effectuer des contrôles fréquents. Dans la majorité des cas, l'auto-étalonnage est réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- 9.1 oscillateur d'étalonnage à fréquence variable de façon continue, avec contrôle de l'amplitude par couple thermoélectrique. C'est probablement cette méthode qui assure la meilleure stabilité à long terme;
- 9.2 oscillateur d'étalonnage à fréquence variable de façon continue, avec diode à cristal, diode à vide ou indicateur de courant de grille. En général, il vaut mieux ne pas utiliser ce dernier indicateur à cause des erreurs qu'il introduit souvent;
- 9.3 oscillateur d'étalonnage à fréquence fixe pour régler la sensibilité du mesureur de champ en un point au moins de chaque bande. Cette méthode présente l'inconvénient suivant: si l'alignement varie, il peut en résulter des erreurs importantes aux fréquences autres que la fréquence fixe, à moins que l'on n'effectue un contrôle supplémentaire, en employant, par exemple, un générateur d'impulsions pour extrapoler à d'autres fréquences;
- 9.4 diode de bruit (en particulier pour les appareils de mesure de bruits). C'est un dispositif d'étalonnage de faible encombrement qui est commode pour les mesures du bruit ou pour les mesures grossières, mais, tel qu'il est utilisé actuellement, il ne donne pas entièrement satisfaction, car il pose certains problèmes de précision, auxquels s'ajoutent des effets de largeur de bande. Il est possible que les défauts d'instabilité observés soient dus au fait que les appareils utilisant ce dispositif sont portatifs, plutôt qu'aux erreurs intrinsèques d'une diode de bruit;
- 9.5 générateur d'impulsions (en particulier pour les appareils de mesure de bruits). Il vaut mieux employer ces générateurs pour la mesure des bruits de caractère impulsif, mais ils présentent l'inconvénient suivant: en cas de variations de la largeur de bande du récepteur, l'étalonnage peut être erroné pour des mesures autres que celles portant sur des bruits de caractère impulsif;
- 9.6 générateur de signaux incorporé, avec atténuateur correspondant. C'est probablement la meilleure méthode de toutes, mais elle est plus onéreuse et elle met en œuvre des appareils d'un poids plus élevé; elle exige, en effet, un blindage et un filtrage très efficaces.

D'une façon générale, les dispositifs d'auto-étalonnage donnent des résultats satisfaisants pendant des durées limitées et il convient de contrôler les appareils périodiquement, en les comparant à des étalons; on doit, si possible, choisir des étalons qui émettent des signaux de même nature que le signal à mesurer. Il est bon d'opérer des contrôles fréquents, jusqu'à ce que l'on ait déterminé le degré de stabilité de l'appareil. On opérera à différentes valeurs du niveau pour vérifier à la fois les affaiblisseurs et les sources de signaux et on contrôlera également la linéarité du dispositif d'interpolation. Généralement, il y a aussi intérêt à vérifier l'alignement pendant ces opérations de contrôle, à l'aide d'un oscillateur à balayage travaillant à différents niveaux. Les défauts d'alignement peuvent donner lieu à des anomalies de fonctionnement, affecter les rapports d'affaiblissement et la réponse aux signaux à large bande, enfin produire des phénomènes de réaction qui ont pour effet de faire varier la largeur de bande en fonction du niveau des signaux. Ces derniers phénomènes sont dus parfois à la réaction, sur des étages précédents, d'un harmonique de la fréquence intermédiaire, avec, comme conséquence, des variations notables de la sensibilité en fonction de la fréquence. Des phénomènes anormaux, de même nature, ont été constatés dans des appareils où existe un couplage intempestif entre l'oscillateur d'étalonnage et les autres éléments.

10. Autres procédés d'étalonnage

Outre les procédés d'auto-étalonnage, deux autres procédés sont maintenant largement répandus. Pour les fréquences inférieures à 20 MHz, il est possible d'étalonner un mesureur de champ à cadre au moyen d'un deuxième cadre de dimensions connues placé coaxialement par rapport au précédent et dans lequel circule un courant d'intensité connu; ce cadre induit dans le cadre de l'appareil une tension qui peut être calculée exactement [Greene, 1951; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949; Wind]. La deuxième méthode convient particulièrement aux fréquences plus élevées et peut être employée avec

des appareils à cadres et à dipôles; elle consiste à effectuer l'étalonnage au moyen d'ondes polarisées horizontalement dont on connaît le champ rayonné [McPetrie et Saxton, 1941; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949; Wind]. Ces deux méthodes permettent un étalonnage global du mesureur de champ, y compris l'antenne de réception, effectué dans des conditions analogues à celles que l'on est susceptible de rencontrer dans l'utilisation ultérieure de l'appareil.

11. Sources d'alimentation

Toutes les sources d'alimentation doivent être efficacement stabilisées, y compris la source servant au chauffage des tubes; la source d'alimentation doit fournir en permanence une tension suffisante pour assurer un fonctionnement correct du circuit de stabilisation.

12. Précautions spéciales [Chapin]

Avant de procéder à une mesure, on doit:

- 12.1 si cela est possible, contrôler l'un par rapport à l'autre, les affaiblisseurs à fréquence radioélectrique et à fréquence intermédiaire et contrôler ces deux affaiblisseurs par rapport à l'échelle de l'appareil à cadran;
- 12.2 dans la mesure des signaux forts ou dans la mesure d'un signal faible en présence de signaux forts — par exemple des émissions harmoniques ou autres émissions non essentielles — prendre soin d'éviter des surcharges dans les premiers étages de l'appareil. Dans le second cas, il est recommandé d'utiliser des filtres à l'entrée de l'appareil.

13. Caractéristiques des grandeurs à mesurer

En ondes entretenues, il importe assez peu de mesurer telle ou telle grandeur (valeur moyenne, valeur de crête, etc.). En revanche, si l'on a affaire à des signaux complexes, la valeur mesurée du champ ou de la puissance disponible dépend des caractéristiques de l'appareil de mesure, c'est-à-dire des caractéristiques de son indicateur, de sa largeur de bande, de sa dynamique, de son temps d'intégration, etc. C'est pourquoi les appareils doivent être conçus de telle manière qu'ils puissent mesurer un paramètre convenant à l'appréciation du signal considéré. Dans le cas d'un signal régulier de forme connue, il suffit généralement de considérer un seul paramètre; en revanche, lorsqu'on a affaire à des signaux aléatoires tels que les bruits atmosphériques, il faut souvent mesurer deux paramètres, ou plus, pour décrire correctement le phénomène.

13.1 *Mesure des valeurs moyennes*

Le récepteur donne la valeur moyenne d'un signal si le circuit, qui suit un dispositif donnant une indication proportionnelle à l'enveloppe du signal, est conçu pour fournir une valeur moyenne de la tension de sortie, sur un intervalle de temps assez long pour que les fluctuations rapides n'apparaissent pas. On préfère, en général, connaître la valeur moyenne pour de nombreuses classes d'émissions modulées, y compris les émissions de téléphonie à modulation d'amplitude ou de fréquence (A3 et F3). On se sert également de cette valeur dans les émissions de télégraphie par tout ou rien (A1 ou A2), dans les cas où il est possible de maintenir l'émission en permanence sur la position de travail pendant la mesure. On peut aussi se servir de la valeur moyenne pour mesurer la valeur de crête de signaux ayant un facteur de forme élevé, pour des impulsions positives; c'est le cas, par exemple, des signaux image de télévision auxquels correspondent des signaux de synchronisation positifs. Bien entendu, pour obtenir la valeur de crête à partir de la valeur moyenne, on ajoute à celle-ci un facteur de correction connu. C'est aussi cette grandeur que l'on considère dans l'étude des bruits atmosphériques et autres phénomènes perturbateurs.

13.2 *Mesure des valeurs de crête*

Le récepteur donne la valeur de crête d'un signal lorsque l'appareil indicateur est conçu pour délivrer une tension de sortie correspondant à la tension instantanée maximale du signal. Ce résultat peut être obtenu avec l'un des appareils ci-après:

- oscillographe cathodique connecté à la sortie de l'amplificateur à fréquence radioélectrique ou de l'amplificateur à fréquence intermédiaire;
- appareil de mesure à seuil avec indication audible ou visuelle pour le dépassement de seuil;
- appareil de mesure de valeurs de crête avec redresseur à mémoire asservi et dispositif manuel ou automatique de remise à zéro.

La mesure des valeurs de crête est spécialement indiquée dans le cas de signaux ayant un facteur de forme peu élevé, par exemple les brouillages de nature impulsive; toutefois, ces valeurs subissent souvent des fluctuations plus importantes que les pseudo-valeurs de crête ou que les valeurs moyennes. Si la largeur de bande du signal à mesurer est plus grande que celle du mesureur de champ, cette circonstance influera sur la valeur de crête de l'émission telle qu'elle est indiquée par l'appareil. Pour certains signaux simples, les résultats de mesure obtenus pour une largeur de bande donnée peuvent être étendus, moyennant une correction, à une autre largeur de bande, mais on ne saurait généraliser cette loi et si l'on désire faire des mesures comparées, il est nécessaire de normaliser la largeur de bande des mesureurs de champ. Dans ces conditions, il convient de préciser la largeur de bande de l'appareil dans les comptes rendus de mesure. Les considérations relatives aux largeurs de bande dans le cas des pseudo-valeurs de crête s'appliquent également à la mesure des valeurs de crête; le Tableau II du § 13.3 ci-dessous contient des valeurs normalisées de la largeur de bande.

13.3 Mesure des pseudo-valeurs de crête

La pseudo-valeur de crête est celle que l'on obtient lorsqu'on pondère la tension de sortie du détecteur en agissant sur ses constantes de temps de charge et de décharge T_c et T_d ainsi que sur la constante de temps mécanique de l'appareil indicateur T_m . Cette valeur est d'un emploi commode et on l'utilise généralement dans le cas d'émissions manipulées ou pulsées, ou encore pour les émissions dont la valeur moyenne varie en fonction du niveau des signaux de modulation. Cette grandeur convient bien, en général, pour la mesure des brouillages de nature impulsive; moyennant un choix convenable des constantes de temps de charge et de décharge, la mesure des pseudo-valeurs de crête fournit directement une indication sur les effets audibles exercés par des signaux brouilleurs de forme quelconque sur des émissions modulées telles que la téléphonie.

En ce qui concerne les largeurs de bande, on peut faire des considérations analogues à celles exposées à propos de la mesure des valeurs de crête; il faut choisir avec soin la largeur de bande ainsi que les constantes de temps de charge et de décharge, pour les adapter au type d'émission que l'on mesure et pour éviter des phénomènes de surcharge dans l'appareil. Les organismes spécialisés ont approuvé un petit nombre de valeurs normalisées qui sont indiquées dans le Tableau II.

TABLEAU II

Gamme de fréquences (MHz)	Largeur de bande à 6 dB (kHz)	Constante de temps de charge T_c (s)	Constante de temps de décharge T_d (s)	Constante de temps mécanique T_m (s)
0,015 – 0,15	Variable (0,08 – 0,8) ⁽²⁾	0,001 ⁽²⁾	0,600 ⁽²⁾	
0,15 – 30	9 ⁽¹⁾	0,001 ⁽³⁾	0,160 ⁽³⁾	0,160 ⁽¹⁾
	Variable (1 – 12) ⁽²⁾		0,600 ⁽²⁾	
25 – 300	120 ⁽¹⁾	0,001 ⁽³⁾	0,550 ⁽¹⁾	0,1 ⁽¹⁾
	150 ⁽²⁾		0,600 ⁽²⁾	

⁽¹⁾ C.I.S.P.R. [C.I.S.P.R.].

⁽²⁾ A.S.A. [ASA a].

⁽³⁾ Employées par ces deux organismes.

13.4 Tension efficace

La tension efficace [U.R.S.I.] est mesurée au moyen d'un couple thermoélectrique ou d'un circuit électronique quadratique, associé à un circuit approprié de mesure des valeurs moyennes. On mesure directement la puissance moyenne correspondant à la largeur de bande de l'appareil de mesure. Pour les émissions à spectre de fréquences uniformes, la tension efficace est proportionnelle à la racine carrée de la largeur de bande (la puissance moyenne étant proportionnelle à la largeur de bande). La valeur efficace est d'un emploi commode pour un grand nombre de mesures portant sur des phénomènes caractérisés par de grandes largeurs de bande, mais elle est particulièrement utile dans la mesure des

bruits atmosphériques [C.C.I.R.]. Comme le carré d'une grandeur varie dans des proportions plus importantes que la grandeur elle-même, l'appareil de mesure doit avoir une dynamique plus large et des constantes de temps plus grandes. Pour la mesure des bruits atmosphériques, on a obtenu des résultats satisfaisants avec une constante de temps de 500 secondes.

13.5 Valeur logarithmique moyenne

On obtient la valeur logarithmique moyenne en intercalant un amplificateur logarithmique entre le détecteur et le circuit de mesure de la valeur moyenne. Si en même temps que cette valeur, on mesure la valeur moyenne et la valeur efficace, on peut tirer les indications sur la nature des bruits ou sur l'intensité des brouillages qu'ils peuvent causer. Dans le cas des bruits atmosphériques, ces trois paramètres permettent de déterminer complètement la répartition statistique des amplitudes [Crichlow et Spaulding, 1958; U.R.S.I.].

13.6 Mesures statistiques

Il est souvent intéressant de déterminer les variations statistiques du champ en fonction du temps, en considérant la variation des valeurs instantanées ou celle de la valeur moyenne de l'une quelconque des grandeurs énumérées plus haut. La variation de la valeur moyenne peut être mesurée au moyen de totalisateurs de temps à plusieurs seuils préréglés; le temps total pendant lequel chaque seuil est dépassé est indiqué par des compteurs entraînés par des moteurs. On lit les indications de ces compteurs après la période de temps que l'on désire.

Si l'on veut mesurer les variations des valeurs instantanées, on utilise des compteurs électroniques commandés par la valeur instantanée du signal à la sortie de l'étage à fréquence intermédiaire ou du détecteur. On peut obtenir la répartition statistique des amplitudes de ces valeurs à l'aide de circuits à crêteaux et à seuils appropriés. Il s'est avéré utile de déterminer la répartition statistique complète des amplitudes; la connaissance de cette répartition rend des services dans l'étude des brouillages que subissent divers types de signaux reçus, en particulier dans le cas de brouillages dus aux bruits atmosphériques [Watt et autres, 1959].

14. Caractéristiques à mesurer pour les différentes classes d'émission

Le Tableau III résume les caractéristiques qui pourraient être mesurées pour les diverses classes d'émission énumérées à l'article 2 du Règlement des radiocommunications.

TABLEAU III

Classe d'émission	Caractéristiques à mesurer (voir § 12)
A0, A2, A3, A4, A9 F0, F1, F2, F3, F4, F5, F9 ⁽¹⁾ A1 (manipulateur abaissé) A5 (synchronisation négative) ⁽²⁾	Valeur moyenne
A1, A3A, A3B, A9A	quasi-crête
A5 (synchronisation positive) P0 et autres émissions impulsives	quasi-crête ou crête

⁽¹⁾ Il faut s'assurer que la largeur de bande du mesureur de champ est suffisante pour laisser passer les émissions à modulation de fréquence.

⁽²⁾ On a l'habitude de définir en télévision le champ d'un signal de synchronisation négatif par la valeur de crête du blanc. Cette valeur peut être déduite de la valeur moyenne si l'on connaît les caractéristiques du signal émis au moment où l'on fait la mesure.

Lorsque la puissance rayonnée est entièrement, ou dans une large mesure, indépendante du degré de modulation, il devrait suffire, pour la plupart des mesures de champ, de spécifier la puissance de la porteuse non modulée. Cependant, si la puissance rayonnée dépend pour une large part du degré de modulation, il apparaît souhaitable, dans le cas de mesures de champ très précises, que les deux stations terminales coopèrent soit en enregistrant la puissance de sortie de l'émetteur à l'aide d'un appareil ayant des caractéristiques analogues à celles de l'enregistreur de champ, soit en émettant des signaux spéciaux.

15. Puissance rayonnée

La puissance rayonnée par une antenne d'émission peut être définie:

- 15.1 soit par la puissance fournie à l'antenne d'émission diminuée de l'affaiblissement du circuit d'antenne,
- 15.2 soit par la valeur mesurée de la puissance disponible aux bornes d'une antenne de réception sans pertes, augmentée de l'affaiblissement de transmission, la réception étant effectuée en un emplacement choisi avec soin, où il est possible de calculer l'affaiblissement de transmission.

Aux fréquences basses, on détermine souvent la puissance rayonnée en mesurant un champ non affaibli inversement proportionnel à la distance, c'est-à-dire le champ prévisible à une distance égale à l'unité de longueur sur une surface plane parfaitement conductrice. On peut alors déterminer la puissance rayonnée par des calculs dans lesquels on tient compte des caractéristiques de rayonnement de l'antenne considérée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIEE [avril 1951] Recommended practice for measurement of field intensity above 300 Mc/s from radio-frequency industrial, scientific and medical equipments. AIEE 950.
- ASA a – Projet de norme américaine pour les appareils de mesure des bruits et des intensités de champ:
- | | |
|------------|---------------------|
| ASA C.63.2 | 0,015 MHz à 30 MHz, |
| ASA C.63.5 | 25 MHz à 400 MHz. |
- ASA b – Projet de norme américaine sur les méthodes de mesure des tensions et des intensités de champ radioélectriques perturbatrices (bruits radioélectriques):
- | | |
|------------|---------------------|
| ASA C.63.4 | 0,015 MHz à 25 MHz, |
| ASA C.63.3 | 25 MHz à 400 MHz. |
- C.C.I.R. Rapport 322: Révision des données sur les bruits atmosphériques radioélectriques.
- CEI Rapport Sc. 12-1.
- CHAPIN, E. Field strength measurements. FCC Rapport L.D. 6.3.1.
- C.I.S.P.R. – Publication 1: Spécifications de l'appareillage de mesure C.I.S.P.R. pour les fréquences comprises entre 0,15 et 30 MHz.
– Publication 2: Spécifications de l'appareillage de mesure C.I.S.P.R. pour les fréquences comprises entre 25 et 300 MHz.
- CRICLOW, W.Q. et SPAULDING, A.D. [20-22 octobre 1958] A graphical method of obtaining amplitude-probability distribution from statistical moments of atmospheric radio noise; exposé présenté à la réunion commune U.R.S.I.-IRE, Université de l'Etat de Pennsylvanie.
- DIAMOND, H., NORTON, K.A. et LAPHAM, E.G. [décembre 1938] On the accuracy of radio field-intensity measurement at broadcasting frequencies. *NBS Journ. of Research*, **21**, 795-818.
- GREENE, F.M. [décembre 1951] Calibration of commercial radio field-strength meters at the National Bureau of Standards. NBS Circular 517.
- IRE [1942] Standards on radio wave propagation measuring methods. Supplément aux *Proc. IRE*, Vol. 30, 7, Part II.
- MCPETRIE, J.S. et SAXTON, J.A. [1941] Theory and experimental confirmation of calibration of field-strength measuring sets by radiation. *Journal I.E.E.*, **88**, Part III, 11.
- NORTON, K.A. [janvier 1953] Transmission loss in radio propagation. Part I – *Proc. IRE*, **41**.
- NORTON, K.A. [juin 1959] Transmission loss in radio propagation. Part II – NBS Technical Note 12. Office of technical services. U.S. Department of Commerce, Washington 25, D.C.
- SMITH, W.B. [novembre 1945] Recording sky-wave signals from broadcast stations. *Electronics*, **21**, 112.
- SMITH-ROSE, R.L. [janvier 1949] Radio field-strength measurements. *Proc. I.E.E. (Radio and Comm.)*, **96**, Part III.
- TERMAN, F.E. et PETTIT, J.M. [1951] *Electronic Measurements*, chap. XI. McGraw-Hill.
- U.R.S.I. – Comptes rendus de la XII^e Assemblée générale, Boulder, Colorado, Vol. XI, 4^e partie, Commission IV.
– Report N° 254: What are the most readily measured characteristics of terrestrial radio noise from which the interference to different types of communication systems can be determined? 9.
– Recommendation No. 1 and Annex to Recommendation No. 1: Measurement of atmospheric noise, 99.
- WATT, A.D. et autres [juillet 1959] Performance of some radio systems in the presence of thermal and atmospheric noise. *NBS Journ. of Research*, Part B.
- WIND, M. *Handbook of Electronic Measurements*, Vol. II, Chapitre VIII, Polytechnic Institute of Brooklyn, Inter-science Publishers.

BIBLIOGRAPHIE

- NORTON, K.A. [juillet 1959] System loss in radio wave propagation. *NBS Journ. of Research*, Part D.

RAPPORT 228-1 *

**MESURE DU CHAMP POUR LES SERVICES DE RADIODIFFUSION
Y COMPRIS LA TÉLÉVISION SUR ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES**

(Question 7/5)

(1959 – 1963 – 1966)

1. Représentation de la zone desservie

Pour l'assignation de fréquences, la représentation de la zone desservie en radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques (émissions de télévision, de radiodiffusion en modulation de fréquence, etc.), devrait être établie en fonction du service fourni aux téléspectateurs ou aux auditeurs éventuels. On peut caractériser un service d'après la qualité du signal en un emplacement donné. Pour l'assignation des fréquences aux stations, il est probablement nécessaire de ne considérer qu'une seule qualité de service; toutefois, pour d'autres applications, il se peut qu'il soit utile de définir plusieurs qualités.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour représenter la zone desservie par des stations de radio-diffusion travaillant en ondes métriques et décimétriques.

Une méthode acceptable pour le but recherché doit satisfaire aux conditions suivantes [TASO, 1959]:

- 1.1 Elle devrait pouvoir indiquer l'emplacement et l'étendue de toutes les zones recevant un service de qualité donnée.
- 1.2 Elle devrait tenir compte des variations les plus importantes dans le temps.
- 1.3 La méthode devrait être suffisamment fine pour pouvoir décrire l'étendue de la zone desservie (en superficie ou en population) et l'emplacement de cette zone dans des régions différentes et dans des directions différentes à partir de l'émetteur.
- 1.4 Elle devrait pouvoir traduire l'influence des brouillages causés par une ou plusieurs stations sous forme de diminution du service (en étendue et en emplacement).
- 1.5 Elle devrait permettre de caractériser au moins deux qualités de service.
- 1.6 Elle devrait permettre de définir la zone de service au moyen d'un nombre raisonnable de mesures et/ou de calculs du champ.
- 1.7 Elle devrait conduire à une représentation simple sur un diagramme à deux dimensions.

Après avoir étudié, d'une façon approfondie, les différentes méthodes permettant de représenter le service assuré en radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, on recommande [TASO, 1959; FCC, 1949 et 1950] l'emploi d'une certaine « caractéristique de zone » comme étant le meilleur moyen d'expression statistique de la qualité de service. Il est bon d'expliquer le principe de cette méthode statistique pour le lecteur qui n'a jamais eu l'occasion de rencontrer cette expression. Dans des conditions de régime permanent, il a été possible de faire, en laboratoire, une étude statistique des rapports signal utile/signal brouilleur qui sont nécessaires pour donner à différents observateurs l'impression d'une image ou d'un son de qualité acceptable, et ceci en présence de diverses catégories de brouillage. Pour chaque type de brouillage, on définit un « rapport acceptable » qui est le rapport reconnu tel par un certain pourcentage des observateurs, 50 % par exemple. En un lieu donné, il peut y avoir une variation avec le temps des signaux utiles et/ou du signal brouilleur; c'est pourquoi on définit un taux de dépassement qui est le pourcentage de temps pendant lequel la valeur du rapport acceptable est dépassée. Une qualité de service donnée correspond à une certaine valeur du rapport acceptable dépassée pendant un pourcentage de temps donné, lorsqu'on travaille avec une installation de réception déterminée. On définit alors la caractéristique de zone comme la probabilité pour que l'on ait un service de cette qualité ou de qualité meilleure. On peut encore définir la caractéristique de zone comme le pourcentage des lieux de réception situés dans une zone de surface réduite où l'on peut espérer avoir un service de cette qualité ou de qualité meilleure. Pour réduire l'importance des calculs, on peut considérer que 90 % est une valeur satisfaisante du taux de dépassement dans le temps. On pourrait adopter une autre valeur suivant les besoins; on pourrait adopter aussi plusieurs valeurs et plusieurs installations de réception normalisées, afin de caractériser un certain nombre de qualités de service.

* Adopté à l'unanimité.

La méthode de caractéristique de zone définit d'une façon satisfaisante l'emplacement de la zone de service et la qualité du service, du point de vue de ceux qui sont chargés de fixer les caractéristiques et la fréquence de la station, du point de vue de l'exploitant de la station et du téléspectateur ou de l'auditeur. On estime que cette méthode est la plus parlante et la plus commode pour représenter la zone desservie en radiodiffusion à modulation de fréquence (y compris la télévision) et qu'elle satisfait sans difficulté à toutes les conditions énoncées plus haut. Il est préférable de se servir de la caractéristique de zone comme critère, plutôt que du rapport signal/brouillage ou du niveau du signal utile; on a là, en effet, un critère de qualité du service qui est indépendant de la fréquence, de la distance, etc. Le rapport signal/brouillage pourrait être mieux compris, mais il présente l'inconvénient de nécessiter plusieurs chiffres pour caractériser une même qualité de service sur plusieurs fréquences et pour plusieurs distances. Le niveau du signal utile ne constitue pas non plus un critère satisfaisant; il varie, en effet, avec la fréquence et ne permet pas de tenir compte des brouillages autres que le bruit du récepteur. Quand le bruit provient du récepteur seul, les courbes d'égale caractéristique de zone seront des courbes équichamp. Les méthodes de calcul de la caractéristique de zone sont relativement simples et rapides [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957].

Les Fig. 1 et 2 illustrent la manière dont on peut utiliser la caractéristique de zone pour représenter la zone desservie. Les courbes en trait plein représentent des lignes d'égale qualité de service, le long desquelles la caractéristique de zone pour une qualité de service donnée est constante pour une installation normalisée. Lorsque la qualité du service est limitée par le bruit, plutôt que par les brouillages dans la même voie, la caractéristique de zone que l'on trouve à une distance donnée le long d'un rayon quelconque de la Fig. 1 correspond à une valeur médiane fixe du champ pour le temps et pour les emplacements. Par exemple, une caractéristique de zone de 0,5 sur la Fig. 1 correspond à un champ médian de 57 dB par rapport à 1 $\mu\text{V/m}$. La Fig. 1 est extrêmement détaillée, probablement plus que ne pourrait l'être une figure tracée avec un nombre normal de données. Il n'empêche qu'on peut avoir besoin d'une figure aussi détaillée pour certaines portions d'une zone de service donnée, suivant le problème que l'on étudie. La Fig. 2 représente une carte de service pour un cas plus fréquent, celui où l'on ne possède pas un nombre de données aussi grand que dans le cas de la Fig. 1.

C'est un fait bien connu que, dans les conditions normales, bien des gens emploient un récepteur de qualité tout juste assez bonne pour un service satisfaisant, mais qu'ils feront tout pour obtenir ce service. Ainsi, dans les zones où le champ est intense, de nombreux auditeurs emploient des antennes intérieures, alors que dans les zones où il est faible, ils utilisent des installations de très bonne qualité. Il en résulte que le nombre d'auditeurs qui ont une réception satisfaisante peut fort bien être différent du nombre fourni par les calculs de caractéristique de zone effectués pour le cas d'une installation de réception normalisée. Toutefois, si l'on désire obtenir une description objective du service possible, il est souhaitable de se référer toujours à une même qualité de service, la réception étant effectuée sur une installation de réception normalisée. L'adoption d'une installation normalisée permet, d'autre part, de calculer l'effet global de plusieurs sources de brouillage.

Outre qu'elle satisfait à toutes les conditions requises, cette méthode de représentation du service assuré présente un certain nombre d'avantages. Il est possible de calculer la superficie ou la population « équivalente » desservie par un émetteur donné; pour cela, on fait la somme des produits de la caractéristique de zone par la superficie ou la population réelle, à laquelle correspond cette caractéristique [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957].

Cette méthode est également commode pour évaluer l'influence des brouillages dus à des émetteurs voisins, que ces émetteurs soient déjà en service, nouvellement installés ou à l'état de projet. La caractéristique de zone globale, en présence de plusieurs émetteurs brouilleurs, est approximativement égale au produit des caractéristiques de zone individuelles de service de la station utile que l'on obtiendrait si chacune des sources de brouillage agissait individuellement [FCC, 1949 et 1950]. Cette approximation est assez bonne lorsque la probabilité globale ainsi calculée est de 50 % ou plus, et elle est d'autant meilleure que la qualité du service est plus élevée. Il existe également des méthodes plus précises pour calculer les effets de brouillage multiple [FCC, 1949 et 1950; Norton et autres, 1952].

2. Méthode de mesure

Les mesures du champ produit par les stations de radiodiffusion travaillant en ondes métriques et décimétriques sont faites dans les buts suivants:

- 2.1 fournir une base pour évaluer l'étendue de la zone desservie pour une qualité de service donnée;
- 2.2 contrôler le diagramme de directivité d'une antenne d'émission ainsi que la puissance rayonnée par cette antenne;

- 2.3 fournir des données permettant d'accroître les connaissances que l'on possède sur les conditions de propagation dans les bandes considérées.

Il convient que les conditions suivantes soient remplies lorsqu'on effectue les mesures:

- 2.4 les mesures doivent être assez aisément reproductibles, afin qu'on puisse les contrôler ultérieurement si on le désire;
- 2.5 la méthode doit permettre d'obtenir efficacement les renseignements nécessaires;
- 2.6 la méthode ne doit être ni dangereuse, ni trop onéreuse.

Diverses méthodes de mesure, employées couramment, satisfont aux critères ci-dessus à des degrés variables.

Il est incontestablement plus facile d'effectuer les mesures lorsque le collecteur d'ondes est placé à une hauteur de 3 ou 4 m au-dessus du sol; néanmoins, une hauteur de 10 m correspond mieux à la hauteur de l'antenne de réception d'une installation typique. Ayant obtenu des résultats pour une hauteur de 3 m en terrain relativement plat et dégagé, on peut les corriger d'une façon appropriée en fonction de la hauteur; mais rien ne permet de croire qu'une telle correction puisse être faite dans de bonnes conditions pour un terrain très accidenté ou des agglomérations, surtout dans la bande des ondes décimétriques. En conséquence, il semble qu'on ait intérêt à prendre 10 m comme hauteur optimale de l'antenne de mesure, et la solution idéale consisterait à obtenir, à une hauteur normalisée, un très grand nombre de données d'observation indépendantes. D'autre part, lorsque la hauteur de l'antenne d'émission est telle que le champ varie de manière non linéaire en fonction de la hauteur au-dessus du sol pour la bande de fréquences intéressée, il est souhaitable de mesurer le champ à diverses hauteurs jusqu'à 20 m au moins [Gentile, 1966].

Lorsqu'on effectue des mesures pour déterminer la couverture des émetteurs de télévision, la pratique courante consiste à mesurer dans toutes les bandes le champ des signaux « son » et à appliquer un facteur approprié pour obtenir la valeur de crête du champ du signal image, lequel devrait, en règle générale, être en corrélation étroite avec la qualité de la réception. Toutefois, lorsqu'on utilise des antennes de réception directives, il est parfois insuffisant de mesurer seulement l'intensité du signal son pour déterminer la zone de couverture d'un émetteur à la fois pour les signaux vision et les signaux son.

Il est souhaitable que les résultats enregistrés d'une étude donnée se rapportent au champ existant pendant 50 % du temps. Dans un rayon de 20 à 30 km de l'emplacement d'émission, la gamme des évanouissements est, en général, très restreinte et une erreur grave n'est pas à craindre, quel que soit le moment où les mesures sont effectuées et quel que soit le pouvoir de réfraction de la basse atmosphère. Lorsque les mesures sont effectuées à de plus grandes distances dans le cas d'un émetteur de grande puissance, les effets des évanouissements peuvent entraîner une erreur assez grave. A ces distances, il convient, au cours d'une étude, de procéder à des enregistrements continus du champ en un point de référence fixe que l'on peut toutefois être amené à faire varier au cours de l'étude. L'examen de ces enregistrements permet de décider si l'on doit rejeter certaines mesures ou s'il est possible de les ajuster aux conditions normales.

Dans une étude relative à la couverture, on effectue la plupart des mesures dans des villes et dans des bourgs, en les complétant parfois par des mesures faites sur des rayons partant de l'émetteur.

2.7 Mesures aux fréquences inférieures à 100 MHz

Dans la plupart des cas, on procède, sur les fréquences inférieures à 100 MHz, à un enregistrement continu du champ sur un véhicule équipé généralement d'un enregistreur approprié à bande de papier, lequel est couplé mécaniquement aux roues du véhicule. La solution idéale consiste à faire les mesures à la hauteur normalisée de l'antenne de réception, autrement dit à 10 m, mais il ne faut pas oublier que, du point de vue pratique, les mesures doivent porter sur une zone étendue et être menées à bien dans un délai raisonnable. Un grand nombre de mesures comparatives faites à une hauteur de 10 m et à des hauteurs appropriées à l'enregistrement par équipement mobile confirment qu'une correction linéaire donne des résultats assez précis, tout au moins sur les fréquences inférieures à 100 MHz. Il est certain que pour ce genre de mesures par équipement mobile on a avantage à utiliser une antenne omnidirectionnelle.

D'une façon générale, il n'est guère commode de faire des mesures à 10 mètres de hauteur sur de grands tronçons de route, en présence de circuits aériens, d'arbres, etc.; toutefois, il n'y a pas de difficulté à opérer sur de petits parcours (30 à 150 mètres) ou au moyen de mesures individuelles; comme on le verra plus loin en détail, il est possible d'employer un procédé systématique d'échantillonnage pour déterminer l'emplacement de ces tronçons ou de ces mesures individuelles. On peut aussi déterminer le degré de précision avec lequel on évalue la superficie ou la population qui reçoit un service de qualité

donnée. Les mesures sur petites distances sont effectuées le long de courts tronçons de route centrés sur le point de mesure choisi et la valeur médiane du champ mesurée sur cette distance est affectée au point en question. Comparée aux mesures individuelles effectuées en un point déterminé, cette méthode présente l'avantage d'une meilleure reproductibilité des valeurs médianes ainsi obtenues. En revanche, les mesures individuelles sont plus faciles à effectuer et on peut utiliser leurs résultats pour obtenir la répartition du champ en fonction du temps pendant la période considérée.

Dans la présentation des résultats, on porte sur une carte la position exacte des points de mesure et on y indique, suivant le cas, soit la valeur médiane du champ, soit la valeur du champ au point où a été faite la mesure individuelle. Dans un relevé séparé, on note pour chaque point les éléments suivants : topographie locale, hauteur et nature de la végétation, habitations, obstacles, conditions météorologiques, heures de la journée, ainsi que toutes autres caractéristiques locales susceptibles d'avoir une influence sur le champ reçu (le cas échéant, on donne des photographies des lieux de mesure). On indique également les valeurs médianes, maximales et minimales du champ pour le petit parcours ou un groupe de mesures, ainsi que la direction d'arrivée du signal maximal quand elle n'est pas celle de l'émetteur.

2.8 Mesures aux fréquences supérieures à 100 MHz

Sur les fréquences supérieures à 100 MHz, notamment dans les bandes IV et V, le champ doit être mesuré à la hauteur requise de 10 m car on n'a pas le droit d'admettre que le gain varie linéairement avec la hauteur entre 3 et 10 m, dans les bandes d'ondes décimétriques.

Dans ce cas, on fait une estimation du nombre de mesures sur des échantillons indépendants, qui sont requises pour atteindre le degré de précision voulu. En règle générale, il faut une précision plus élevée lorsque le champ mesuré se trouve dans la gamme des intensités critiques comprise entre 46 et 66 dB au-dessus de $1 \mu\text{V/m}$ pour les ondes métriques, et entre 60 et 80 dB au-dessus de $1 \mu\text{V/m}$ pour les ondes décimétriques. Les centres urbains où le champ médian se trouve en dehors de ces gammes peuvent être considérés comme insuffisamment desservis ou comme bénéficiant d'une bonne couverture, de sorte que, dans ces cas, de petites erreurs dans la mesure du champ ne présentent pas beaucoup d'importance. La Fig. 3 indique le nombre de mesures sur échantillons indépendants auxquelles il faut procéder afin d'obtenir une probabilité de 95 % pour que l'erreur probable ϵ commise sur une valeur médiane soit inférieure à 2 ou 4 dB. En pratique, l'erreur acceptable ϵ ne dépasse pas 2 dB dans la zone critique mais peut aller jusqu'à 4 dB dans les cas où la précision revêt moins d'importance. La Fig. 3 tracée dans l'hypothèse d'une répartition log-normale du champ, représente la relation entre le nombre requis d'échantillons et le « facteur de variation » V défini comme étant le rapport, en dB, des champs dépassés respectivement en 50 % et 90 % des points situés dans la ville ou autre zone urbaine considérée.

La valeur du facteur de variation V est généralement comprise entre 5 et 10 dB pour les ondes métriques et entre 5 et 15 dB pour les ondes décimétriques, encore que, dans certains cas, il puisse atteindre 20 dB. La Fig. 4 montre la répartition de V dans un certain nombre de villes du Royaume-Uni pour les bandes des ondes métriques et décimétriques. La valeur médiane de V , utilisée pour la Fig. 4, sert également à déterminer le nombre d'échantillons indépendants requis, mais si au cours d'une étude, on constate que V diffère sensiblement de la médiane des valeurs indiquées dans la Fig. 4, il y a lieu d'augmenter le nombre d'échantillons. En règle générale, le nombre d'échantillons doit être compris entre 10 et 100 si l'on veut respecter les limites indiquées ci-dessus.

Une autre méthode, permettant de déterminer le nombre des échantillons de mesure requis et qui peut présenter des avantages par rapport à la méthode décrite ci-dessus, notamment pour les ondes décimétriques, consiste à mesurer tout d'abord la gamme totale de dispersion R des valeurs du champ en quelques points situés à haute et basse altitude. On peut admettre que la gamme R est égale à 6σ , σ étant l'écart type. Pour une répartition log-normale, $V = 0,214 R$.

Pour évaluer l'étendue de la zone de service, on peut considérer la méthode de mesure comme un procédé d'échantillonnage dans lequel la répartition cumulée des échantillons donne une estimation des variations dans une zone donnée. Le choix des emplacements de cet échantillonnage doit être fait sans idée préconçue et doit représenter aussi fidèlement que possible des installations types d'exploitation. Un facteur important qui influe sur le choix des emplacements d'échantillonnage est le fait que des mesures successives effectuées en des points adjacents ont tendance à présenter une certaine corrélation entre elles (corrélation de série). Si l'on fait les mesures en des points suffisamment éloignés les uns des autres pour éliminer cette corrélation de série, on obtient une estimation satisfaisante des variations du champ. L'étude a montré que les mesures successives présentent une corrélation de série appréciable si l'on fait ces mesures en des points distants au maximum de un à deux kilomètres, perpendiculairement au trajet [Kirby, 1957; Kirby et Capps, 1956; Kirby et autres, 1956]. Si les mesures sont faites sur des rayons vecteurs autour d'un point, on aura une corrélation de série pour des espacements encore plus grands.

2.9 Choix des emplacements de mesure

Les emplacements de mesure dans les régions urbaines doivent, dans la mesure du possible, être choisis au hasard en consultant un plan de la ville considérée; la densité des mesures doit cependant varier en fonction de la répartition de la population. En chaque point de mesure, on peut, soit relever une seule valeur-échantillon du champ, soit faire une série de quatre ou cinq mesures faites en des points espacés de quelques mètres seulement, et enregistrer la moyenne estimée de ces quatre ou cinq valeurs qui constitue alors la valeur mesurée applicable à un « emplacement-échantillon ». On constate fréquemment qu'il existe une bonne corrélation entre les mesures de champ effectuées en des points espacés de quelques mètres, notamment si l'on utilise une antenne à plusieurs éléments, mais que les écarts sont beaucoup plus importants dans le cas de mesures faites en des points éloignés les uns des autres, par exemple dans les différents quartiers d'une ville. On préfère souvent la méthode dite de « l'échantillon unique », car les « séries » de mesures exigent beaucoup de temps du fait qu'il faut élever et abaisser fréquemment l'antenne de réception et, d'autre part, il faut tenir compte des risques encourus lorsqu'on déplace le véhicule de mesure avec antenne complètement sortie. Cependant, il est plus aisé de reproduire la moyenne d'une série de mesures qu'une observation sur un échantillon unique et l'on peut montrer que le nombre de mesures en série qui sont nécessaires pour évaluer le facteur de variation global avec une certaine précision, dans la zone considérée, est inférieur de quelque 10 à 15 % au nombre de mesures sur « échantillon unique ».

Toutes les mesures sur échantillons s'effectuent avec une antenne de réception d'une hauteur normalisée de 10 m. En ondes décimétriques et métriques, sur un terrain vallonné, il convient d'utiliser des antennes directives afin d'obtenir une discrimination vis-à-vis des signaux d'échos provenant des collines et des bâtiments environnants.

On a tracé pour chaque région urbaine considérée un graphique représentant la répartition du champ par emplacements. Ce graphique permet de déterminer le pourcentage d'emplacements où une valeur de champ donnée est dépassée.

Pour obtenir une estimation de la répartition cumulée du champ dans un élément de surface de la zone de service, il convient de faire des mesures d'échantillonnage dans des conditions telles que les caractéristiques de la propagation soient les mêmes dans toute la zone de mesure. On ne tiendra pas compte, par exemple, des effets systématiques tels que les grandes variations du champ avec la distance. On peut obtenir ce résultat en faisant chaque série de mesures dans une zone ou dans une portion annulaire centrée sur l'émetteur.

Les emplacements de mesure doivent être disposés sur des cercles ou sur des arcs de cercle centrés sur l'émetteur. Le choix des rayons de ces cercles dépend, dans une large mesure, des valeurs prévisibles de la caractéristique de zone. C'est pourquoi il est extrêmement utile d'estimer à l'avance la loi de variation de la caractéristique de zone en fonction de la distance pour le cas particulier considéré. La Fig. 5 donne un exemple de cette loi de dépendance basée sur une loi de variation du champ en fonction de la distance, pour un émetteur de télévision travaillant dans la bande de 54 à 88 MHz, et en admettant que les valeurs du champ dans les zones de mesure élémentaires sont distribuées suivant une répartition logarithmique normale avec un écart type de 6 dB. Les études de la propagation sur terrain accidenté à ces fréquences [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957; Kirby et Capps, 1956; Kirby et autres, 1956; Kühn, 1958] montrent que le logarithme du champ obéit en première approximation à une répartition normale. Dans cet exemple, les valeurs de la caractéristique de zone fournissent le pourcentage de zones de mesures situées à la distance indiquée, dans lesquelles on peut prévoir que le champ dépassera 57 dB (par rapport à 1 $\mu\text{V/m}$). La Fig. 6 représente un mode de répartition possible des emplacements de mesure. Il convient de noter que, dans cet exemple, on propose que la concentration maximale des points de mesure soit située à une distance pour laquelle la caractéristique de zone est de 0,5, cela afin d'obtenir des renseignements pour toute la zone de service avec le maximum d'efficacité. L'espacement entre les points de mesure adjacents doit être choisi tel que l'on puisse supprimer, ou tout au moins réduire au minimum, les effets de la corrélation de série.

2.10 Représentation des résultats

Lorsqu'on porte sur une carte géographique les emplacements de mesure proposés, déterminés comme l'indique la Fig. 6, on s'aperçoit qu'un grand nombre de ces emplacements sont situés dans des régions inaccessibles. Il faudra alors probablement faire la mesure au point accessible le plus proche. Il est important de choisir ces points de remplacement de façon à éviter de fausser les résultats; c'est ce qui se produirait, par exemple, si un trop grand nombre de ces points de remplacement était concentré le long de routes à grande circulation.

En plus des résultats de mesures fondamentales de champ, il serait relativement simple d'indiquer d'autres résultats d'observation. En un certain nombre d'emplacements spécialement choisis, on pourrait enregistrer les variations en fonction du temps pendant une période suffisamment longue. On pourrait également faire des observations sur l'influence de la hauteur et de la directivité des antennes, sur la qualité des images ou du son, etc. Des mesures supplémentaires pourraient être effectuées dans des régions présentant un intérêt spécial.

En plus de la méthode de représentation de la couverture décrite dans ce Rapport, on a l'habitude de présenter une carte de champ indiquant la position des courbes médianes. Le nombre de détails à indiquer dépend du degré d'irrégularité du terrain; ces détails sont plus nombreux pour les ondes décimétriques que pour les ondes métriques. Cette carte doit être complétée par un tableau indiquant le champ médian et le facteur de variation pour 50 % à 90 % des emplacements dans chacun des plus grands centres urbains.

Il y aurait également intérêt à présenter une carte analogue à celle de la Fig. 1, dans laquelle ne seraient indiquées que deux ou trois des principales démarcations de la zone de service; par exemple, la région à l'intérieur de laquelle plus de 70 % ou 95 % des téléspectateurs obtiennent, dans n'importe quelle localité, un service de qualité satisfaisante.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FCC [mai 1949 et 7 juillet 1950] Federal Communications Commission. Volumes I and II of the Report of the ad hoc Committee for the evaluation of the radio-propagation factors concerning the television and FM broadcasting services in the frequency range between 50 and 250 Mc/s. Mimeograph 36830 et Mimeograph 54382.
- GENTILE, G. [juin 1966] Mesure de champ aux fréquences supérieures à 30 MHz. Méthode appliquée par le Centre de contrôle de la RAI à Monza. *Revue de l'U.E.R.*, 97-A.
- KIRBY, R.S. [février 1957] Measurement of service area for television broadcasting. *Trans. IRE*, PGBTS-7, 23.
- KIRBY, R.S. et CAPPS, F.M. [janvier 1956] Correlation in VHF propagation over irregular terrain. *Trans. IRE* Vol. AP-4, 1, 77.
- KIRBY, R.S., DOUGHERTY, H.T. et MCQUATE, P.L. [juillet 1956] VHF propagation measurements in the Rocky Mountain Region. *Trans. IRE*, PGVC-6, 13.
- KÜHN, U. [février et mai 1958] Ausbreitungsuntersuchungen über unterschiedlichem Gelände in den Frequenzbändern I, II und III (Recherches au sujet de l'effet des divers types de terrain dans les bandes I, II et III). *Tech. Mitt. BRF (RDA)*.
- NORTON, K.A., STARAS, H. et BLUM, M. [février 1952] Statistical approach to the problem of multiple radio interference to FM and television service. *Trans. IRE*, Vol. AP-1, 43.
- TASO [mars 1959] Television Allocation Study Organization. Report to the Federal Communications Commission of Committee 5.3.

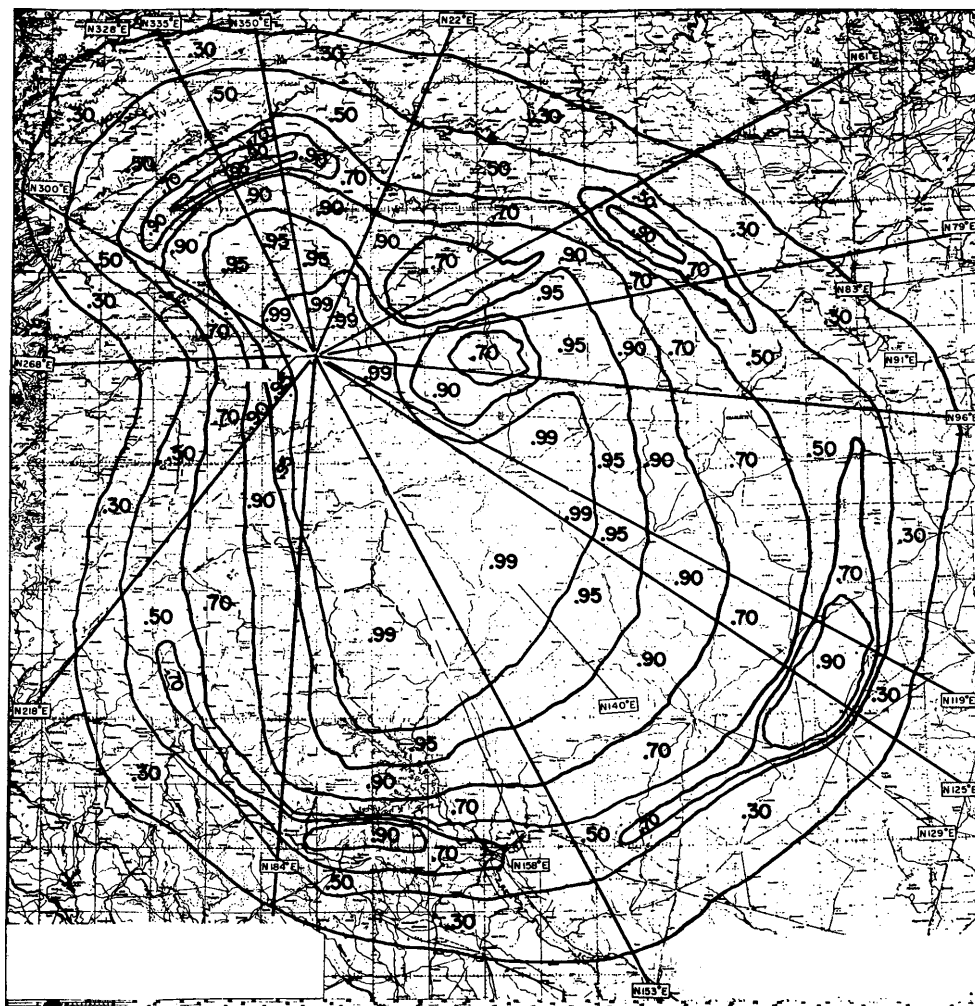


FIGURE 1

Notion de caractéristique de zone

Les nombres indiquent le pourcentage des lieux de réception
où la qualité du service est acceptable pendant au moins 90% du temps

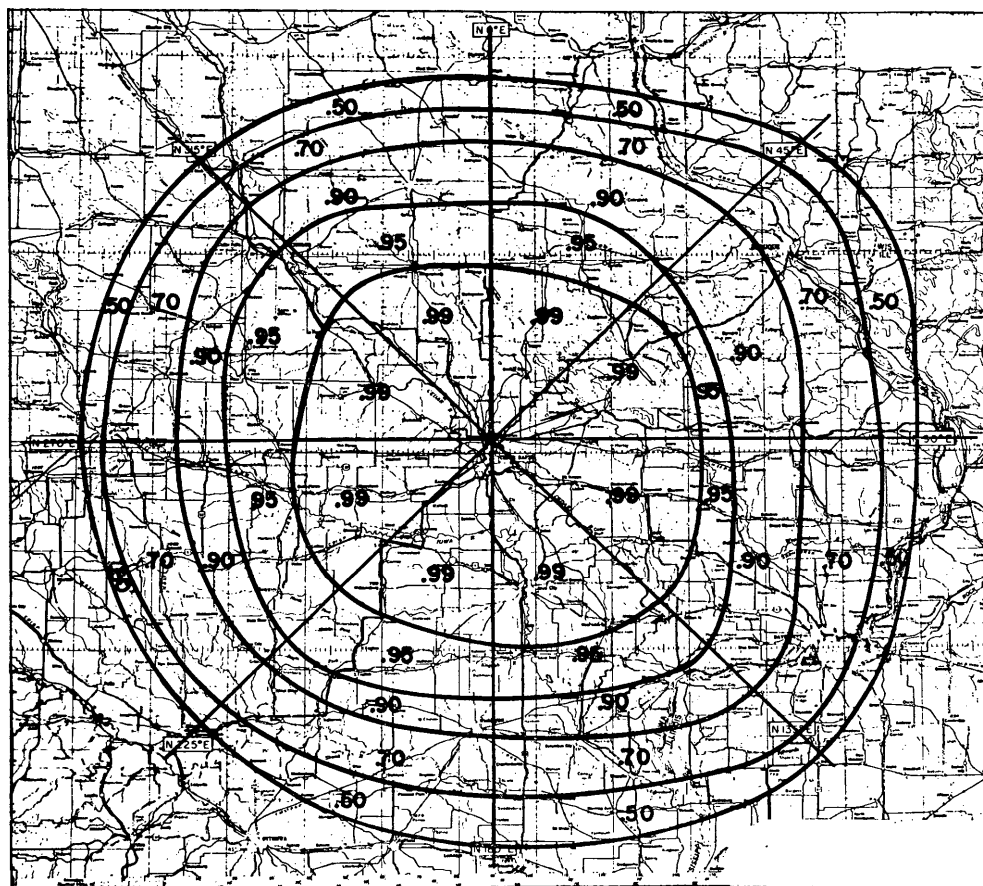


FIGURE 2

Notion de caractéristique de zone

Les nombres indiquent le pourcentage des lieux de réception où la qualité du service est acceptable pendant au moins 90 % du temps

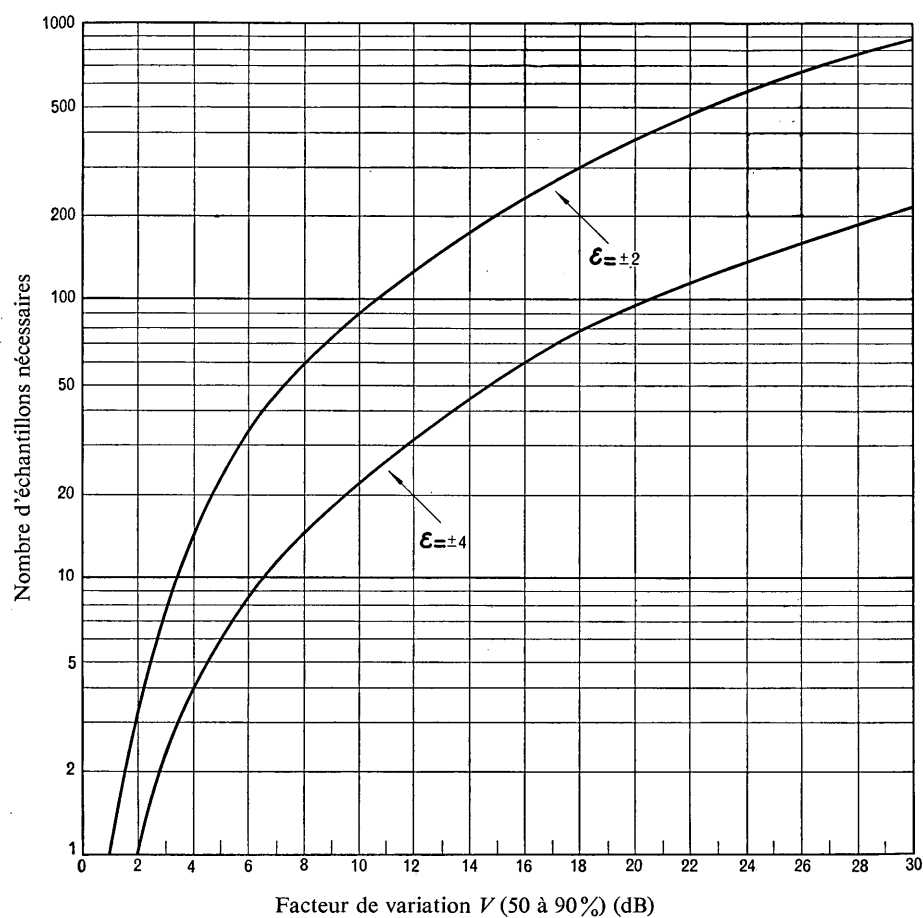
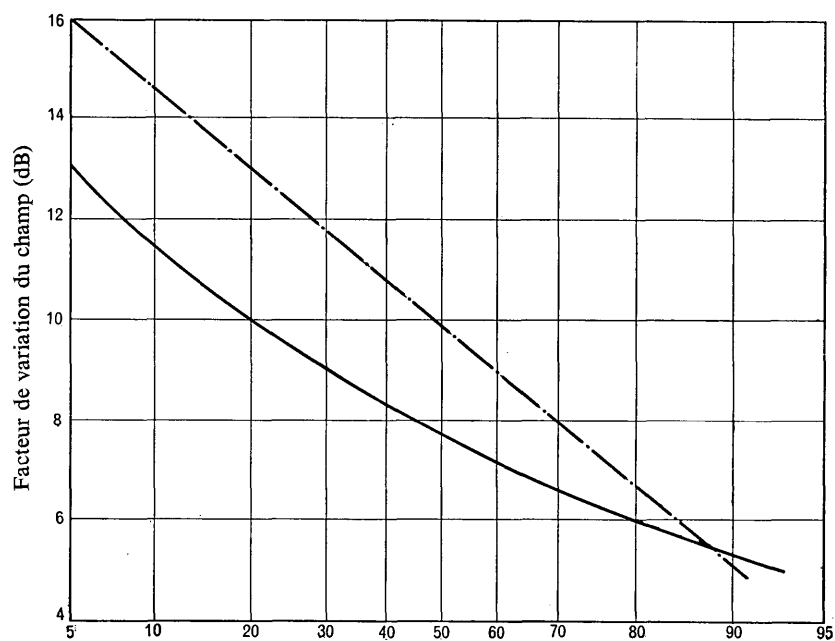


FIGURE 3

Nombre des mesures d'échantillonnage nécessaires afin de donner une probabilité de 95% pour que l'erreur, ϵ , sur la valeur médiane soit inférieure à 2 dB ou à 4 dB



Pourcentage des villes dans lesquelles le facteur de variation dépasse la valeur indiquée en ordonnées

FIGURE 4

Distribution des valeurs du facteur de variation pour les villes du Royaume-Uni

Toutes les mesures ont été faites avec une antenne de réception à 10 m au-dessus du niveau du sol

— · — · — Mesures dans la bande V dans 121 villes
 — — — Mesures dans la bande III dans 40 villes

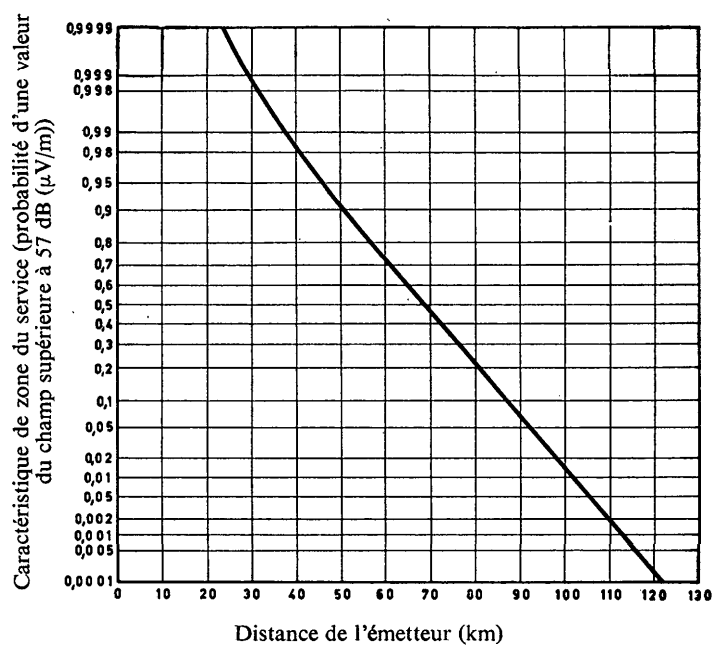


FIGURE 5

Variation de la caractéristique de zone du service en fonction de la distance à l'émetteur d'après la caractéristique de propagation typique d'une station de télévision d'une puissance apparente rayonnée de 100 kW fonctionnant dans la bande 54 à 88 MHz

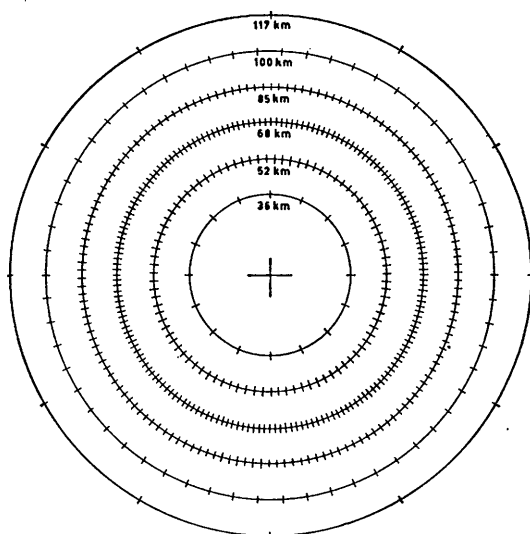


FIGURE 6

Disposition possible des emplacements de mesure pour une station de 100 kW dans des conditions moyennes de terrain

(L'émetteur est au centre de la figure)

RAPPORT 239-3 *

**RÉSULTATS STATISTIQUES RELATIFS A LA PROPAGATION, POUR LE SERVICE DE
RADIODIFFUSION DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES
COMPRISES ENTRE 30 ET 1000 MHz**

(Programme d'études 7D/5)

(1959 – 1963 – 1966 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Le présent Rapport donne des indications sur la construction et l'usage des courbes de propagation de l'Avis 370-2; il comprend des résultats statistiques descriptifs relatifs au gain de hauteur des antennes et aux phénomènes de dépolarisation: on y examine aussi l'influence des zones urbaines et de la végétation sur la propagation. Dans la dernière section, on propose une méthode améliorée de calcul du champ au-dessus de trajets mixtes.

Le Rapport 240, Genève, 1963, avait pour objet de fournir des courbes de propagation pour la radiodiffusion, mettant en évidence les différences de climat auxquelles il y a lieu de s'attendre dans le continent africain. On espère que les administrations des pays d'Afrique, une fois qu'elles auront mis en service des émetteurs fonctionnant dans ces bandes de fréquences, fourniront des données supplémentaires que l'on pourra comparer avec ces courbes **.

Le Rapport 236-3, qui va de pair avec ce Rapport, étudie l'influence du terrain sur la propagation, ainsi que la base théorique de quelques-uns des paramètres qui interviennent dans le tracé des courbes de champ en fonction de la fréquence, de la distance, de la hauteur des antennes et de la nature du terrain. Le Rapport 228-1 étudie les mesures de champ pour le service de radiodiffusion: il en fait une analyse descriptive et montre comment on peut employer les courbes de propagation pour décrire des zones de service réelles. Pour la prévision de l'affaiblissement de transmission entre points fixes (valeurs médianes à long terme et variabilité dans le temps), on emploie habituellement d'autres méthodes de prévision. Un résumé de certaines d'entre elles, en cours d'étude par le Groupe de travail intérimaire créé aux termes de la Résolution 2-2, a été publié précédemment [NBS, 1967].

Des résultats de mesures de champ ont été communiqués par de nombreuses administrations; ces résultats ont été combinés pour établir les courbes de propagation [Kühn, 1958; Fine; Saxton, 1954; Saxton et Harden, 1954; Kirke et autres, 1951; TASO, 1959]. Les courbes ont été élaborées lors de la Réunion d'experts du C.C.I.R., Cannes, 1961, afin de préparer la Conférence de radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, Stockholm, 1961, et elles sont mises à jour et complétées par des données recueillies récemment [C.C.I.R., 1966-1969a; Fedi et autres, 1973; C.C.I.R., 1970-1974 a, b, c, d et e; Dumas et Joly, 1972; Kühn, 1968; Kühn et autres, 1969].***

Le présent Rapport repose sur les définitions suivantes:

- 1.1 Les valeurs du champ ont été rapportées à une puissance de 1 kW rayonnée par un dipôle demi-onde.
- 1.2 La hauteur de l'antenne d'émission est définie comme étant la hauteur de cette antenne au-dessus du niveau moyen du sol entre les distances de 3 km et de 15 km à partir de l'émetteur, dans la direction du récepteur.
- 1.3 La hauteur de l'antenne de réception est définie comme étant la hauteur au-dessus du terrain local.

* Adopté à l'unanimité.

** Les courbes de propagation pour la radiodiffusion sur le Continent africain sont contenues dans les Actes finals de la Conférence africaine de radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, Genève, 1963, pages 343-379.

*** Les courbes pour les trajets maritimes et les trajets mixtes terre-mer sont basées principalement sur des mesures effectuées en Europe dans les régions de la mer du Nord et de la Méditerranée. Des mesures sont nécessaires pour vérifier dans quelle mesure ces courbes s'appliquent aux autres régions de mer froide et de mer chaude respectivement.

2. Distances supérieures à celle de l'horizon

Les données à long terme relatives aux distances au-delà de l'horizon ont été classées en deux catégories correspondant respectivement aux gammes d'ondes métriques et aux gammes d'ondes décimétriques et subdivisées encore selon que les trajets sont terrestres ou maritimes. Les Fig. 1, 2 et 3 représentent les courbes moyennes tracées d'après ces données.

La Fig. 1 représente les courbes de propagation en ondes métriques aux grandes distances: elle résulte d'une très grande quantité de données obtenues sur de nombreux trajets terrestres et maritimes au moyen d'antennes d'émission et de réception de diverses hauteurs. Les données ont été rapportées à une hauteur d'antenne émettrice de 300 m en supposant que le champ était fonction seulement de la distance entre les horizons. Dans cette hypothèse, le champ à une distance X km de l'émetteur, pour une hauteur d'antenne de h_1 mètres, est le même que le champ lu sur la courbe pour une hauteur d'antenne d'émission de 300 m à une distance $(X + 70 - 4,1 \sqrt{h_1})$ km. On peut appliquer cette méthode à des distances supérieures à celle de l'horizon, et c'est ce qui a été fait pour les courbes de la Fig. 1 à 200 km et au-delà; on a ainsi obtenu la famille de courbes représentées aux Fig. 1 à 4c de l'Avis 370-2. Cependant, cette méthode a servi uniquement à tracer les courbes A (terre) et B (mer du Nord) de la Fig. 1 du présent Rapport. Les courbes relatives à la mer Méditerranée correspondent à des trajets qui traversent les parties occidentale et centrale de cette région maritime et ne peuvent donc s'appliquer qu'à ces parties de la Méditerranée, tant qu'on ne dispose pas de résultats pour les autres parties. Les portions des courbes correspondant aux courtes distances, aux Fig. 4a, 4b et 4c de l'Avis 370-2, ont été tracées de façon qu'elles coïncident avec les courbes terrestres à une distance d'environ 10 km.

La Fig. 2 représente, pour les bandes des ondes décimétriques, une famille de courbes de propagation analogues pour des trajets terrestres. Ici également, les courbes, qui se rapportent à une hauteur d'antenne émettrice de 300 m, représentent des valeurs moyennes déduites d'une grande quantité de données qui ont été obtenues sur de nombreux trajets terrestres dans de nombreuses régions du monde. Les courbes relatives à des valeurs différentes de la hauteur de l'antenne d'émission ont été déduites de ces courbes en supposant que le champ dépend seulement de la distance entre les horizons, comme on l'a exposé dans le paragraphe précédent. Elles sont représentées dans les Fig. 9, 10 et 11 de l'Avis 370-2.

Une importante conclusion à tirer des mesures faites par l'O.I.R.T. pendant une période de trois ans sur cinq trajets à 1100 MHz situés en Europe centrale est que la variance du champ est, pour plusieurs trajets, nettement supérieure à celle indiquée par l'Avis 370-2. Ces trajets étaient de nature à être particulièrement influencés par les effets superposés de plusieurs mécanismes de propagation. Par exemple, on a observé que sur des trajets de quelque 200 km de longueur, la différence entre le champ dépassé pendant 1 % et 50 % du temps est de l'ordre de 30 dB à comparer avec une différence d'environ 18 dB que l'on obtiendrait en interpolant les courbes de l'Avis 370-2 pour une fréquence moyenne d'environ 700 MHz (milieu des bandes IV et V).

Les courbes de la Fig. 3 donnent les champs pour des trajets maritimes, dépassés pendant 1 %, 5 %, 10 % et 50 % du temps dans les bandes IV et V (450 à 1000 MHz). Pour des distances comprises entre 200 et 1000 km, les courbes de 50 % et 10 % sont rapportées à une hauteur d'antenne émettrice de 300 m, conformément à la méthode décrite plus haut. Les données à grande distance déjà obtenues montrent que, pour les petits pourcentages de temps, le champ reçu est relativement indépendant de la hauteur de l'antenne émettrice. C'est pourquoi la courbe de 1 % n'a pas subi de correction pour la hauteur de l'antenne émettrice. La courbe de 5 %, qui a été obtenue par interpolation entre les courbes de 1 % et 10 %, est donc affectée d'environ la moitié de la correction due au gain de hauteur.

Les courbes de l'Avis 370-2 pour d'autres hauteurs de l'antenne d'émission ont été établies pour ces distances au moyen de la méthode décrite plus haut. Ces courbes sont fondées sur des résultats de mesure obtenus sur un certain nombre de trajets dans la région de la mer du Nord, chaque fois pendant environ dix-huit mois, entre novembre 1958 et septembre 1964 ainsi que sur les résultats de mesures faites dans le nord et le centre de la Méditerranée, chaque série de mesures s'étendant sur une période d'environ trois ans (août 1968 – août 1971). On a observé que, dans la région de la Méditerranée en particulier, les valeurs du champ sont beaucoup plus élevées durant les mois d'été [Fedi et autres, 1973] que durant les mois d'hiver. Les mesures étaient faites en des emplacements du littoral, bien dégagés et avec vue directe sur la mer. Pour que les courbes soient applicables au calcul des brouillages dans le même canal, dans des villes côtières, où l'on peut s'attendre à ce que le champ soit inférieur à ce qu'il est dans les emplacements dégagés, on leur a fait subir une correction d'environ -7 dB par rapport aux valeurs mesurées. Il convient de noter que ces corrections doivent être appliquées à toutes les valeurs mesurées dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques en des emplacements du littoral bien dégagés.

Des mesures faites dans les bandes IV et V sur des distances inférieures à 200 km dans la région de la mer du Nord [C.C.I.R., 1970-1974f] montrent que pendant 50 % et 10 % du temps, le champ peut dépasser de plusieurs dB les valeurs déterminées d'après l'Avis 370-2, mais la concordance est meilleure pour 1 % du temps.

Des mesures de champ faites en Suède pendant des périodes allant de 7 mois à 4 ans, en ondes métriques sur trois trajets et en ondes décimétriques sur trois trajets, dans la région de la mer Baltique [C.C.I.R., 1966-1969b; C.C.I.R., 1970-1974d] ont donné, pour les trajets en ondes métriques, des résultats qui concordent avec les valeurs indiquées dans l'Avis 370-2 pour la région de la mer du Nord. On constate cependant que la variation du champ est importante d'un mois à l'autre; pour le mois le plus défavorable, le champ mesuré pendant 1 % et 10 % du mois dépasse les valeurs estimées, d'une quantité comprise entre 30 et 40 dB.

Des mesures faites par l'O.I.R.T. durant une période de trois ans [Kühn et autres, 1969] confirment que les valeurs indiquées dans l'Avis 370-2 pour la région de la mer du Nord sont également applicables à la région de la mer Baltique. On a toutefois observé que durant de faibles pourcentages de temps les valeurs mesurées du champ ont tendance à être légèrement plus élevées que les valeurs prévues.

Il ressort de certaines observations que pour de faibles mais non négligeables pourcentages du temps, on peut recevoir des signaux perceptibles d'émetteurs puissants situés à des distances dépassant 4000 km dans des régions tropicales. Par exemple, un émetteur fonctionnant avec une puissance rayonnée apparente de 1 kW sur une fréquence de 417 MHz a donné à une distance de 4740 km (à travers l'océan Atlantique) un champ mesuré de 0,15 $\mu\text{V/m}$ pendant approximativement 2 % de l'année [Misme, 1966].

3. Distances inférieures à celle de l'horizon

Pour les distances inférieures à celle de l'horizon normal, on a tracé les courbes de propagation en comparant, d'une part, les données fournies sur des trajets courts par de nombreux essais effectués avec des équipements mobiles et par un certain nombre de mesures à long terme effectuées en des points fixes, d'autre part, les courbes théoriques de propagation sur une terre régulière, pour les valeurs correspondantes de la fréquence et de la hauteur des antennes. On a constaté que la variation du champ en fonction de la fréquence était relativement peu importante et on a classé les données en deux catégories (ondes métriques et ondes décimétriques) comme pour les distances supérieures à celle de l'horizon.

La Fig. 1 de l'Avis 370-2 représente les champs dépassés pendant 50 % du temps pour les ondes métriques. Les courbes relatives aux distances inférieures à celle de l'horizon normal ont été obtenues par comparaison avec les courbes théoriques pour une terre unie. Ces courbes ont ensuite été raccordées de façon régulière avec les familles de courbes correspondantes pour les distances supérieures à celle de l'horizon, comme il est décrit dans la section précédente. La Fig. 1 de l'Avis 370-2 contient donc des portions de courbes se rapportant à des distances inférieures à celle de l'horizon, comme à des distances supérieures mais aussi des courbes pour des distances intermédiaires qui résultent alors du raccordement des deux autres portions de courbes.

Les Fig. 2a et 4a de l'Avis 370-2 représentent les champs en ondes métriques dépassés respectivement pendant 10 % et 1 % du temps. Ces courbes ont été obtenues selon un procédé très semblable à celui utilisé pour la Fig. 1. On a admis que les évanouissements sont négligeables pour les faibles distances, de sorte que les courbes médianes de la Fig. 1 de l'Avis 370-2 peuvent servir de guide pour les petites distances et peuvent être raccordées avec les courbes 10 % et 1 % des autres figures.

Les champs à courte distance indiqués aux Fig. 3a, 3b, 4b et 4c de l'Avis 370-2, qui représentent les courbes pour la propagation dans la bande des ondes métriques sur des trajets maritimes avec dépassement pendant 5 % et 1 % du temps, ont été établis selon une hypothèse analogue, à savoir que les champs à 5 % et 1 % pour la propagation terrestre ou maritime ne devraient pas être sensiblement différents à une distance de 10 km de l'émetteur. Les courbes maritimes ont donc été raccordées harmonieusement avec les courbes terrestres à cette distance.

De la même façon, on a tracé une famille de courbes du champ en fonction de la distance pour les ondes décimétriques. Ces courbes sont représentées aux Fig. 9, 10 et 11 de l'Avis 370-2 pour des trajets terrestres et aux Fig. 13, 14a, 14b, 15a, 15b, 16a et 16b pour des trajets maritimes.

4. Influence des irrégularités du terrain

Lorsque les emplacements de réception de radiodiffusion sont pris au hasard sur des routes ou à leur voisinage et dans des vallées, les valeurs médianes de l'affaiblissement de transmission sont plus élevées que si l'on choisit très soigneusement ces emplacements. Tout d'abord, l'inégalité du terrain augmente le champ escompté ou médian en supprimant l'effet néfaste de concordance de phase entre la propagation en visibilité directe et les ondes radio-électriques réfléchies ou diffractées par le sol. Lorsque le terrain devient encore plus irrégulier et encombré, les signaux s'affaiblissent par effet d'écran, par absorption (y compris l'effet de la végétation) et par diffusion et divergence ou défocalisation des ondes diffractées. La convergence ou la focalisation ou la réflexion spéculaire jouent aussi un rôle dans ces phénomènes de propagation par trajets multiples, ainsi que le font la réfraction moyenne, la turbulence et la stratification de l'indice de réfraction dans l'atmosphère.

Deux phénomènes jouent un rôle prépondérant dans la formation des ondes stationnaires complexes qui déterminent le gain dû à la hauteur d'antenne à une distance fixe d'un émetteur. En présence de réflexion ou de diffraction sur une surface suffisamment unie et suffisamment grande, il faut s'attendre à un gain de hauteur linéaire aux faibles valeurs de la hauteur, tandis que si l'on élève une antenne réceptrice au-dessus des irrégularités et des obstacles du terrain, il faut s'attendre à un gain de hauteur résultant des causes tout à fait différentes exposées à l'alinéa précédent.

Les phénomènes de dépolarisation sont examinés dans le Rapport 122-2 et certaines mesures récentes sont exposées ci-dessous. Dans ce cas encore, le choix des emplacements est d'importance primordiale, soit pour éliminer les signaux brouilleurs, par exemple, ou pour tirer parti de la dépolarisation avec diversité: la discrimination par polarisation est meilleure dans une zone bien dégagée et pour des signaux de haut niveau que lorsque le champ est faible, comme c'est le cas pour les transmissions sur les ondes décimétriques dans des zones où une antenne réceptrice est entourée d'obstacles.

La nature de l'emplacement de réception exerce également une influence importante sur les phénomènes de polarisation des ondes. Par exemple, des observations effectuées en République Fédérale d'Allemagne sur ondes métriques [C.C.I.R., 1966-1969c] ont montré qu'aux emplacements masqués, les réflexions ont peu d'effet sur les signaux à polarisation horizontale tandis que, sur les signaux à polarisation verticale, leurs effets sont souvent suffisamment importants pour dégrader sérieusement la réception MF.

Il est intéressant maintenant d'examiner quelques aspects des problèmes que posent l'irrégularité du terrain, la végétation, etc., en considérant plus spécialement l'utilisation de courbes de propagation dans les bandes des ondes métriques et décimétriques.

4.1 Le paramètre Δh

L'influence des irrégularités du terrain est d'autant plus forte que la fréquence est plus élevée. Cette influence est donc plus grande pour les ondes décimétriques (bandes IV et V) que pour les ondes métriques (bandes I, II et III). Le paramètre Δh est utilisé pour définir le degré d'irrégularité du terrain. Il représente la différence entre 10 % et 90 % des altitudes dépassées sur le trajet entre 10 et 50 km de distance de l'émetteur (voir la Fig. 7 de l'Avis 370-2). Toutes les courbes de propagation sur trajets terrestres se rapportent à un type de terrain moyennement vallonné que l'on rencontre fréquemment en Europe et en Amérique du Nord et qui est caractérisé par une valeur $\Delta h = 50$ m.

Si l'on pouvait imaginer une expérience théorique dans laquelle des enregistrements de longue durée seraient effectués en un grand nombre de points, la répartition de valeurs médianes dans le temps pour chacun de ces points serait alors celle indiquée à la Fig. 5 de l'Avis 370-2 pour la propagation des ondes métriques sur un terrain vallonné typique caractérisé par $\Delta h = 50$ m.

On admet également que l'intervalle de variation de cette répartition en fonction des emplacements — c'est-à-dire la pente de la courbe de répartition — est, en première approximation, indépendant du degré d'irrégularité du terrain en ce qui concerne les ondes métriques; cela étant, on peut considérer que la répartition représentée à la Fig. 5 de l'Avis 370-2 est applicable pour la plupart des valeurs usuelles de Δh .

La Fig. 12 de l'Avis 370-2 indique les distributions types d'emplacements pour plusieurs valeurs de Δh , pour les bandes d'ondes décimétriques; on n'a pas le droit d'admettre que l'amplitude de l'intervalle de variation reste le même.

En plus de l'augmentation de l'intervalle de variation en fonction de l'irrégularité du terrain, il faut aussi signaler que les champs moyens reçus sont d'autant plus petits que le terrain est plus accidenté, c'est-à-dire que Δh est plus grand. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence est plus élevée. Des mesures effectuées récemment en République Socialiste Tchèque et au Royaume-Uni ont confirmé que les corrections indiquées dans les Fig. 8a et 8b de l'Avis 370-2 sont valables pour des distances allant jusqu'à 100 km, cela dans les bandes III, IV et V [U.E.R., 1965]. Des mesures faites par l'O.I.R.T. [Kühn, 1968] indiquent qu'il faut utiliser le même facteur de correction pour la bande II que pour la bande III.

Dans ce qui précède, il est entendu que le facteur de correction de l'affaiblissement doit être retranché du champ pour la valeur requise de Δh . Les Fig. 8a et 8b de l'Avis 370-2 donnent les valeurs de ce facteur pour des distances supérieures à 200 km.

Pour les distances comprises entre 100 km et 200 km, on trouve le facteur de correction par interpolation linéaire entre les deux courbes mentionnées plus haut.

Des études récentes ont montré que le paramètre Δh ne suffit pas à lui seul pour définir de façon précise le facteur de correction de l'affaiblissement. On a constaté par exemple que, en un point quelconque situé sur un trajet de transmission défini par $\Delta h \approx 50$ m, l'estimation du champ médian peut être entachée d'une erreur supérieure à 20 dB. En général, cependant, cette erreur ne dépasse pas 10 dB; elle a tendance à être plus petite dans les bandes d'ondes métriques que dans les bandes décimétriques.

On s'est efforcé d'améliorer la précision en introduisant empiriquement de nouveaux facteurs de terrain. On trouvera ci-dessous la liste de ces méthodes, qui peuvent être appliquées dans les cas où l'on a besoin d'estimations plus précises que celle réalisable avec le seul paramètre Δh .

- 4.1.1 Méthode mise au point en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1963–1966a], dans laquelle la détermination du paramètre dépend dans une large mesure non seulement de la valeur quadratique moyenne de Δh mais également de la pente moyenne du terrain.
- 4.1.2 Méthode mise au point en République Populaire de Pologne [C.C.I.R., 1963–1966b], selon une variante de la méthode TASO [LaGrone, 1960]; dans cette méthode, la valeur du paramètre dépend de Δh et de la longueur d'onde moyenne des ondulations du terrain.
- 4.1.3 Méthode mise au point au Royaume-Uni [U.E.R., 1965], dans laquelle on utilise des paramètres qui dépendent de Δh et de la pente moyenne du terrain. Une méthode analogue a également été mise au point au Japon pour déterminer les champs [Okumara et autres, 1968].
- 4.1.4 Une méthode employée au Japon [Kinase, 1969] fait intervenir un paramètre Γ qui traduit les effets produits par un environnement encombré d'obstacles au voisinage du point de réception. Cela s'ajoute aux corrections pour les accidents de terrain et introduit des corrections pour les zones urbaines.
- 4.1.5 Les différentes méthodes d'évaluation décrites ci-dessus sont toutes fondées, soit sur les corrections du champ calculé pour la propagation au-dessus d'une terre sphérique uniforme, soit sur l'hypothèse selon laquelle il existe des obstacles bien définis provoquant des diffractions sur le trajet de transmission. Toutefois, dans une autre méthode récemment mise au point au Japon [Okumara et autres, 1968], le champ en espace libre est pris comme norme initiale de référence pour la propagation au-dessus de n'importe quelle sorte de terrain.

4.2 Influence d'une modification de la hauteur de l'antenne de réception

4.2.1 Valeurs médianes du gain de hauteur

Les travaux faits par diverses administrations [Uhlen, 1962; Králík et autres, 1962; C.C.I.R., 1970–1974c] montrent les valeurs du gain de hauteur auxquelles on peut s'attendre lorsqu'on porte la hauteur de l'antenne de réception de 3 m à 10 m au-dessus du niveau du sol. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit:

Bandes I et II Les valeurs médianes du gain de hauteur sont de 9 à 10 dB sur des terrains vallonnés ou plats, pour des zones rurales et urbaines.

Bande III Les valeurs médianes du gain de hauteur sont de 7 dB sur des terrains plats et de 4 à 6 dB dans les zones urbaines ou vallonnées.

Bandes IV et V Dans ces bandes, les valeurs médianes du gain de hauteur dépendent beaucoup de l'irrégularité du terrain. La Fig. 4 montre la manière dont ces valeurs médianes dépendent de Δh . Dans les zones suburbaines, la médiane est de 6 à 7 dB et dans les régions sur lesquelles sont situés de nombreux bâtiments élevés, elle est de 4 à 5 dB.

Les valeurs ci-dessus s'appliquent à des distances inférieures ou égales à 50 km de l'émetteur. Pour des distances supérieures à 100 km, les valeurs indiquées doivent être réduites de 50 % (il convient de procéder à une interpolation linéaire pour les distances intermédiaires).

Des mesures faites au Japon [Kinase, 1969] donnent des valeurs du gain de hauteur des antennes de réception, en fonction d'un paramètre Γ qui tient compte d'un environnement encombré d'obstacles.

De même, des mesures faites au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1970-1974c] révèlent que les composantes du signal polarisées horizontalement et verticalement présentent toutes deux, entre 3 m et 10 m au-dessus du sol, une variation linéaire du gain avec la hauteur de l'antenne, mais qu'on observe peu de changement dans la composante verticale reçue lorsque l'antenne a moins de 3 m de hauteur.

En un emplacement donné d'une zone, la valeur réelle du gain de hauteur peut différer de plusieurs décibels de la valeur médiane.

4.2.2 Rapport entre le champ dans les zones urbaines et dans les zones suburbaines

Les données actuellement disponibles montrent que, si les antennes de réception sont suffisamment élevées au-dessus du niveau des toits environnants, le champ reçu sera pratiquement celui donné par les courbes de l'Avis 370-2.

L'expérience a montré que, dans les bandes I et II, il n'existe pas une grande différence entre les champs mesurés à une hauteur de 10 m dans les zones rurales et dans les zones urbaines. Dans la bande III, des travaux faits en République Populaire de Pologne ont montré que les champs observés à une hauteur de 10 m dans les zones urbaines étaient à peu près équivalents à ceux que l'on obtient dans les régions rurales et que les valeurs de l'affaiblissement maximal au centre d'une zone urbaine étaient les suivantes: dans une zone urbaine de 400 000 habitants, 16 dB à 10 m et 6 dB à 16 m (niveau moyen des toits), et dans une zone urbaine de 80 000 habitants [TASO, 1959], 12 dB à 10 m. Dans les zones de construction dense, les champs reçus peuvent être réduits de 6 à 16 dB selon le caractère des bâtiments. On a essayé à la suite de mesures plus approfondies faites, en bande IV, en République Populaire de Pologne [Ogulewicz, 1971] de lier l'atténuation dans les zones urbaines à un facteur de densité des constructions (voir le § 4.1.4). Ces mesures ont été effectuées pour une zone se trouvant en limite du service et dans laquelle l'angle d'arrivée du signal était petit; elles ont montré que l'atténuation pouvait varier de 3 dB pour un facteur de densité des constructions faible à 28 dB pour une valeur élevée de ce facteur. Cependant, dans les zones de très grande densité de construction, on doit tenir compte du gain de hauteur au-dessus de 10 m, la valeur moyenne de ce dernier étant, dans les grandes villes, de 12 dB lorsqu'on double la hauteur de l'antenne de réception. En ce qui concerne les ondes décimétriques, des travaux effectués récemment au Royaume-Uni ont révélé un affaiblissement médian de 9 dB pour les zones urbaines, dans le sud-est de l'Angleterre. Des expériences effectuées en Italie dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques dans des zones à forte densité de construction ont montré que le coefficient d'affaiblissement supplémentaire dépend principalement de la densité de construction et de la hauteur des bâtiments, de l'angle d'arrivée des ondes à l'antenne réceptrice et de l'orientation de la rue par rapport à la direction de l'émetteur vu de l'emplacement de réception.

Il importe de recueillir un échantillonnage statistique plus important pour chaque type de situation urbain.

4.2.3 Antennes sur le toit et antennes intérieures

On a comparé le signal reçu par des antennes installées sur les toits et à l'intérieur des habitations de la ville de New York, tant du point de vue du champ que de l'appréciation subjective de la qualité de l'image de télévision. Les distributions de l'affaiblissement de transmission d'un point à un autre étaient log-normales, avec des écarts types de 16 et 14 dB pour les mesures faites respectivement sur les toits et à l'intérieur des habitations. Dans ces distributions, les valeurs médianes variaient de 16 à 35 dB selon la fréquence, le type de bâtiment et le type de trajet. Cette différence était plus grande de 7 dB à 570 MHz qu'à 55 MHz, de 10 dB pour des bâtiments en béton armé que pour des maisons de bois et de 5 dB à l'intérieur de l'île de Manhattan qu'à l'extérieur de cette île.

Au Royaume-Uni, des mesures faites en ondes décimétriques (600 MHz) dans des immeubles suburbains à deux étages, au rez-de-chaussée et dans les combles, ont mis en évidence un affaiblissement moyen de 19 dB et 10 dB respectivement, par comparaison avec des mesures faites à une hauteur de 10 m dans la rue, à l'extérieur de ces immeubles [Sofaer et Bell, 1966].

4.3 Phénomènes de dépolarisation

On définit le facteur de dépolarisation comme le rapport de l'amplitude de la composante à polarisation orthogonale, produite par un certain mécanisme de propagation, à l'amplitude de l'onde plane initiale polarisée.

Si l'émetteur se trouve en terrain dégagé, le découplage obtenu au niveau des toits dans une zone urbaine, par l'emploi de polarisations orthogonales, peut avoir une valeur médiane de 18 dB; les valeurs correspondantes qui sont dépassées en 90 % et 10 % des points de réception sont respectivement de 9 dB et 29 dB (voir le Rapport 122-2). Des mesures faites au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1970-1974c] confirment cette valeur médiane lorsque la hauteur de l'antenne de réception est comprise entre 2,5 m et 10 m. Le découplage est meilleur en terrain découvert et moins bon en des points de réception encombrés d'obstacles, ou lorsque les conditions de réception sont médiocres. De même, des mesures faites au Royaume-Uni révèlent qu'avec des antennes de réception peu élevées le découplage est faible.

Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne sur 520 et 700 MHz ont montré que la dépolarisation des ondes polarisées verticalement dépasse de 1 à 2 dB celle des ondes polarisées horizontalement. Par ailleurs, des études effectuées au Royaume-Uni sur la fréquence 570 MHz ont montré qu'avec une antenne polarisée verticalement et orientée à 180° d'une onde incidente polarisée horizontalement, le découplage dépasse de 6 dB le rapport avant/arrière (16 dB) de l'antenne.

L'Administration de la République Socialiste Tchécoslovaque [Králík et autres, 1961 et 1962] et d'autres administrations ont étudié l'influence exercée par la nature du terrain au voisinage du point de réception. Des mesures faites à la fréquence 570 MHz dans la zone de service ont montré que la dépolarisation augmente, avec l'irrégularité du terrain, aux points de réception de la même manière que l'affaiblissement par diffraction. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau I.

TABLEAU I

Type de terrain	Valeur médiane de l'affaiblissement de propagation par rapport à l'espace libre (dB)	Discrimination de polarisation dépassée en 90 % des emplacements (dB)
Région suburbaine, en visibilité directe de l'émetteur	7	18
Région suburbaine, zone de faible diffraction	26	13
Région suburbaine, zone de diffraction modérée	31	10
Région suburbaine, zone de forte diffraction	40	4
Région très boisée, (arbres feuillus, aucun obstacle de terrain)	27	2

La dernière ligne du Tableau I montre que dans une zone boisée la dépolarisation est beaucoup plus importante que dans d'autres régions où l'affaiblissement de propagation est le même.

Des mesures faites à Heidelberg, en République Fédérale d'Allemagne, sur les fréquences 520 et 700 MHz, ont révélé que l'influence de la fréquence et de la densité de construction des bâtiments est négligeable. Le Tableau II montre quelle est l'influence des variations du paramètre Δh .

TABLEAU II

Type de terrain	Δh (m)	Discrimination de polarisation dépassée en 90 % des emplacements (dB)	Discrimination de polarisation dépassée en 50 % des emplacements (dB)
Plat	10	20	30
Vallonné	50	14	27
Montagneux	200	0	16

4.4 Affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments

L'affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments dépend de la fréquence. La Fig. 5 résume les résultats des données déjà publiées [Saxton et Lane, 1953; LaGrone, 1953; LaGrone et Chapman, 1961; Herbstreit et Crichlow, 1964; Josephson et Blomquist, 1958; Head, 1960] couvrant toute une gamme de caractéristiques de végétation. Il est également question de l'affaiblissement au-dessus de terrains boisés dans la section 3.7 du Rapport 229-2.

Des études plus récentes effectuées au Japon [Kinase, 1969] ont permis d'obtenir des valeurs de l'affaiblissement derrière des bâtiments en fonction de la fréquence, de la hauteur et de la profondeur des bâtiments, et de l'angle d'arrivée. Ces résultats concordent avec ceux qui ont été fournis par des mesures faites à 100, 200 et 700 MHz.

Des mesures faites au Royaume-Uni [Sofaer et Bell, 1966] ont donné des valeurs de l'affaiblissement obtenu derrière divers types de bâtiments, en ondes décimétriques (600 MHz); ces valeurs peuvent atteindre 30 dB. D'autres mesures [Sofaer et Bell, 1966], effectuées au-delà de bois composés d'espèces feuillues, en été et en hiver, montrent que si l'affaiblissement dû au feuillage n'est pas négligeable en ondes décimétriques, il est néanmoins beaucoup moins important que celui qui est dû à des arbres dénudés.

On a relevé des mesures comparatives faites avec des ondes à polarisation horizontale et à polarisation verticale: bien que la différence ne soit pas toujours prononcée, il semble que l'affaiblissement ait tendance à être légèrement plus grand avec la polarisation verticale.

Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne ont montré qu'à la fréquence de 190 MHz et sur des trajets en visibilité directe, le champ en polarisation verticale est inférieur de 3 dB à celui que l'on obtient en polarisation horizontale; cette différence se trouve portée à 4,5 dB pour des emplacements masqués. D'autres mesures [C.C.I.R., 1966-1969c] effectuées à des emplacements masqués, sur 97 MHz, ont montré que cette différence était de 5 dB avec un écart de $\pm 5,2$ dB. A 500 MHz, les différences de propagation entre les polarisations sont beaucoup moins marquées, les valeurs correspondantes étant 0 dB et 1,5 dB. On a constaté que la qualité subjective des images de télévision est en bonne corrélation avec les résultats de ces mesures.

5. Trajets mixtes, terre-mer

Lorsqu'il s'agit d'un trajet mixte terrestre-maritime, il faut faire une estimation concernant l'influence de ce trajet sur l'intensité du signal reçu.

Des mesures faites dans la région de la mer Baltique par la Suède [Josephson et Blomquist, 1958; Carlsson et autres, 1972] montrent que, pour évaluer le champ sur des trajets mixtes terre-mer, il faut utiliser la méthode fondée sur les conclusions de Millington [1949 et 1950]. Une description de cette méthode figure dans l'Annexe à l'Avis 368-2. Cette méthode est applicable lorsqu'on sait que la propagation se fait par l'onde de sol, par exemple avec des antennes de hauteur modérée, en deçà ou légèrement au-delà de l'horizon, et dans la partie inférieure de la bande des ondes métriques.

Une méthode de calcul du champ en ondes décimétriques pour un trajet mixte terre-mer a été mise au point au Royaume-Uni et est illustrée par les courbes de la Fig. 6 qui indiquent le champ pour des trajets, au-dessus de la mer du Nord, A, et des trajets terrestres B, pour 1 % du temps, avec une hauteur d'antenne émettrice de 300 mètres.

Supposons que le trajet de transmission se compose d'un tronçon maritime de 200 km suivi d'un tronçon terrestre de 100 km. Pour le calcul, on a supposé que le trajet est parcouru dans les deux sens et l'on a pris la moyenne géométrique des deux résultats comme champ requis.

La courbe A de la Fig. 6 indique que le champ créé à 200 km est de 59,5 dB ($\mu\text{V/m}$). La distance à laquelle ce champ est atteint sur la courbe B est de 31 km. Cette dernière distance est la distance équivalente à 200 km de la courbe maritime sur la courbe terrestre pour un champ de 59,5 dB ($\mu\text{V/m}$). On peut donc admettre que l'onde qui a parcouru 200 km de trajet maritime se trouve dans la même condition que si elle avait parcouru la distance terrestre équivalente de 31 km. Elle continuera donc à subir un affaiblissement selon la courbe B le long des 100 derniers kilomètres du trajet. Ainsi, la distance équivalente de l'ensemble du trajet est de 131 km, et le champ à cette distance sur la courbe terrestre est de 28,8 dB ($\mu\text{V/m}$).

Recommençons le même processus dans le sens inverse. Après 100 km de trajet terrestre, la courbe B indique un champ de 35 dB ($\mu\text{V/m}$). La distance équivalente sur la courbe A est de 403 km. La distance équivalente de l'ensemble du trajet sur la courbe maritime est donc de 603 km et le champ à cette distance sur la courbe A est de 21 dB ($\mu\text{V/m}$). La moyenne des deux résultats est donc :

$$E = (1/2) (28,8 + 21) \approx 25 \text{ dB } (\mu\text{V/m})$$

qui est le champ requis.

Pour des trajets composés de plus de deux tronçons, il suffit d'étendre la méthode qui vient d'être décrite.

Les propositions faites ci-dessus ont été confirmées par des mesures et sont actuellement les plus satisfaisantes pour le calcul du champ sur un trajet mixte terre-mer. Toutefois, des études faites récemment dans la région de la mer du Nord par le Royaume-Uni [C.C.I.R., 1966–1969d et 1970–1974b] et dans la région méditerranéenne pour l'Italie [Fedi et autres, 1973] ont montré que, si la concordance est bonne quand le trajet terrestre est court par rapport au trajet maritime, elle est en revanche médiocre quand la proportion de trajet terrestre est plus grande, les valeurs mesurées étant alors nettement inférieures aux valeurs calculées.

Toutefois, les mesures effectuées par la Suède dans la région de la mer Baltique [C.C.I.R., 1970–1974d] indiquent que sur certains types de trajets mixtes les valeurs mesurées peuvent être plus élevées que les valeurs prévues.

Il est nécessaire que de nouvelles études soient entreprises d'urgence pour compléter les données disponibles avant qu'une nouvelle méthode de calcul pour des trajets mixtes puisse être présentée au C.C.I.R.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CARLSSON, G., WESTER, L.Å. et LINDQUIST, R. [mai 1972] Influence de la ligne côtière sur la propagation de l'onde de sol HF. (en suédois). Conférence radioscientifique, Lund.
- C.C.I.R. [1963 – 1966a] Doc. V/24, République Fédérale d'Allemagne.
- C.C.I.R. [1963 – 1966b] Doc. V/28, République Populaire de Pologne.
- C.C.I.R. [1966 – 1969a] Doc. V/134, France.
- C.C.I.R. [1966 – 1969b] Doc. V/30, Suède.
- C.C.I.R. [1966 – 1969c] Doc. V/103, République Fédérale d'Allemagne.
- C.C.I.R. [1966 – 1969d] Doc. V/14 et V/16, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970 – 1974a] Doc. 5/53, Italie.
- C.C.I.R. [1970 – 1974b] Doc. 5/29, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970 – 1974c] Doc. 5/26, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970 – 1974d] Doc. 5/76, Suède.
- C.C.I.R. [1970 – 1974e] Doc. 5/192, Italie et France.
- C.C.I.R. [1970 – 1974f] Doc. 5/153, Royaume-Uni.

- DUMAS, M. et JOLY, P. [février 1972] Propagation en ondes métriques et décimétriques au-dessus de la Méditerranée. *Revue de l'U.E.R.*, cahier A, Technique.
- FEDI, F. RICCARDI, M. et RODINO DI MIGLIONE, F. [novembre 1973] Propagation des ondes décimétriques à grande distance sur la Méditerranée. *Alta Frequenza* – Edition anglaise, N° 6, Vol. XLII, 11.
- FINE, H. UHF Propagation within line-of-sight. FCC Report T.R.R., 2. 4. 12.
- HEAD, H.T. [1960] The influence of trees on television field strengths at UHF. *Proc. IRE*, 48, 1016.
- HERBSTREIT, J.W. et CRICLOW, W.Q. [1964] Measurement of the attenuation of radio signals by jungles. *Radio Science*, 68D, 903.
- JOSEPHSON, B. et BLOMQUIST, A. [1958] The influence of moisture in the ground, temperature and terrain on ground-wave propagation in the VHF band. *IRE Trans.*, AP-6, 169.
- KINASE, A. [mars 1969] Influence of terrain irregularities and environmental clutter surroundings on the propagation of broadcasting waves in the UHF and VHF bands. N.H.K. Technical Monograph 14, Japon.
- KIRKE, H.L. et autres [1951] A VHF field strength survey on 90 MHz. *Proc. I.E.E.*, 98, Part III, 343.
- KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [déc. 1961 et mars 1962] Ausbreitungsmessungen bei 480 MHz und 780 MHz im Gebirge der Niederen Tatra (Mesures de propagation à 480 et 780 MHz dans les montagnes de Bas-Tatras (République Socialiste Tchèqueoslovaque)). *Techn. Mitteilungen BRF*, Vol. 5, 4, 174 (décembre 1961) et *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, 1, 18 (mars 1962).
- KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [1962] Ausbreitung von Dezimeterwellen bei horizontaler und vertikaler Polarisation und Höhenabhängigkeit der Feldstärke im Gebirge (Propagation des ondes décimétriques en polarisations horizontale et verticale, et variation du champ en fonction de la hauteur en terrain montagneux.) *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, 4, 162-166.
- KÜHN, U. [février et mai 1958] Ausbreitungsuntersuchungen über unterschiedlichem Gelände in den Frequenzbändern I, II und III (Etude de la propagation des ondes sur un terrain irrégulier, dans les bandes de fréquences I, II et III). *Tech. Mitteilungen BRF* (R.D.A.).
- KÜHN, U. [1968] Die Geländedämpfung im UKW-Rundfunkband (87,5 à 100 MHz) (Affaiblissement dû au terrain en radiodiffusion à ondes métriques (87,5 à 100 MHz)). *Nachrichtentechnik* 18, 18, 414-415.
- KÜHN, U. TROMMER, H. et OGULEWICZ, S. [1969] Mehrjährige Ausbreitungsuntersuchungen bei 495 MHz auf der Seestrecke Jaroslawiec-Sassnitz (Ostsee) (Etudes pluriannuelles de la propagation à 495 MHz sur le trajet maritime Jaroslawiec-Sassnitz (Baltique)). *Techn. Mitt. RFZ*, Vol. 13, 3, 128-133.
- LAGRONE, A.H. [1953] Height-gain measurements at VHF and UHF behind a grove of trees. *IEEE Trans.*, BC-9, 37.
- LAGRONE, A.H. [juin 1960] Forecasting television service fields. *Proc. IRE*, Vol. 48, 6.
- LAGRONE, A.H. et CHAPMAN, C.W. [1961] Some propagation characteristics of high UHF signals in the immediate vicinity of trees. *IRE Trans.*, AP-9, 487.
- MILLINGTON, G. [1949] *Proc. I.E.E.*, Partie III, 53-64.
- MILLINGTON, G. [1950] *Proc. I.E.E.*, Partie III, 209-222.
- MISME, P. [1966] Propagation transhorizon à très grandes distances au-dessus de l'Atlantique intertropical. *Ann. des télécomm.*
- NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, Revised, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
- OGULEWICZ, S. [1971] Propagation en ondes décimétriques dans les zones urbaines. *Prace Instytutu Łączności*, Vol. XVIII, 4 (64) (en polonais) – Un résumé de cet article a été présenté dans le Doc. C.C.I.R. 5/81 (République Populaire de Pologne) 1970 – 1974.
- OKUMARA, Y. et autres [septembre-octobre 1968] Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Review of Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, 9-10.
- SAXTON, J.A. [1954] Basic ground-wave propagation characteristics in the frequency band 50 à 800 MHz. *Proc. I.E.E.*, 101, Part III, 211.
- SAXTON, J.A. et HARDEN, B.N. [1954] Ground-wave field strength survey at 100 and 660 MHz. *Proc. I.E.E.*, 101, Part III, 215.
- SAXTON, J.A. et LANE, J.A. [1953] VHF and UHF reception. *Wireless World*, 61, 229.
- SOFAER, E. et BELL, C.B. [juillet 1966] Factors affecting the propagation and reception of broadcasting signals in the UHF bands. *Proc. I.E.E.*, Vol. 113, 7.
- TASO [1959] Report of Television Allocations Study Organization to the Federal Communications Commission.
- U.E.R. [1965] Monographie C.
- UHLEN, N. [1962] Tele I. Fältstyrkemätningar och räckviddsbestämning för radioanläggningar (Mesures du champ et calculs de la gamme de couverture pour stations radioélectriques (en suédois)).

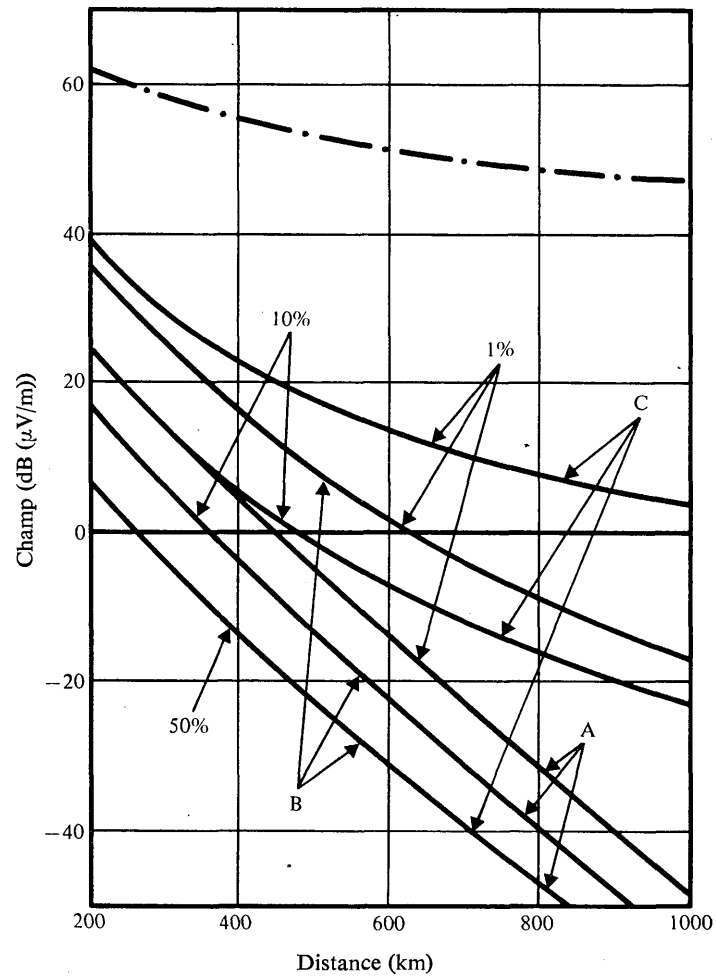


FIGURE 1

Champ (dB (μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 30 à 250 MHz (Bandes I, II et III) — 50% des emplacements —
 $h_1 = 300$ m — $h_2 = 10$ m

Le pourcentage de temps est indiqué sur la courbe

Courbe A: Terre

Courbe B: Mer du Nord

Courbe C: Méditerranée

— · — · — · Espace libre

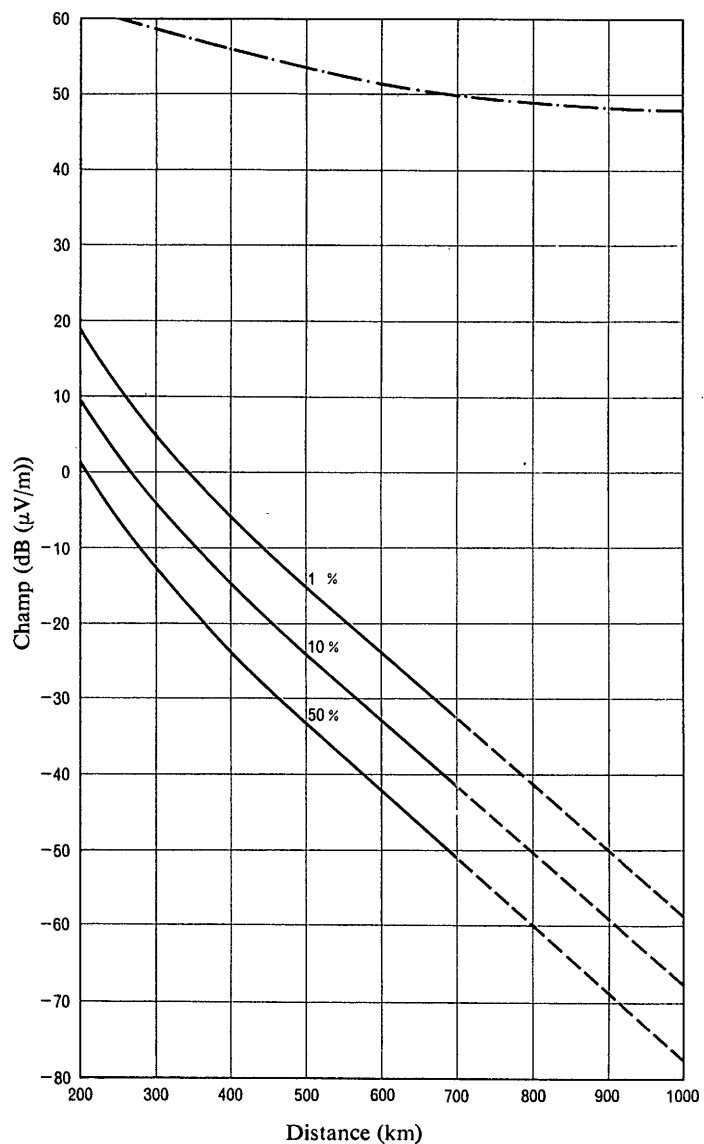


FIGURE 2

Champ (dB (μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — 50% des emplacements —
 $h_1 = 300$ m — $h_2 = 10$ m — Terre

Le pourcentage de temps est indiqué sur la courbe

— · — · — · — Espace libre

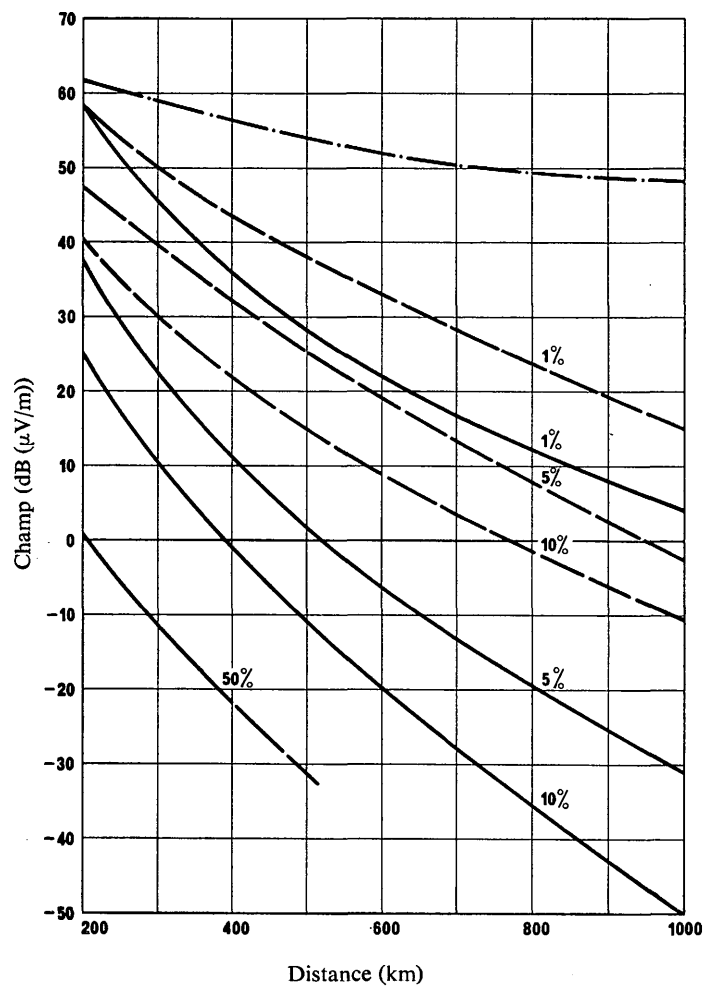


FIGURE 3

Champ (dB (μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée

Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) — 50% des emplacements de réception —
 $h_1 = 300$ m — $h_2 = 10$ m — mer

Le pourcentage de temps est indiqué sur la courbe

- Mer du Nord
- - - Mer Méditerranée
- · - · - Espace libre

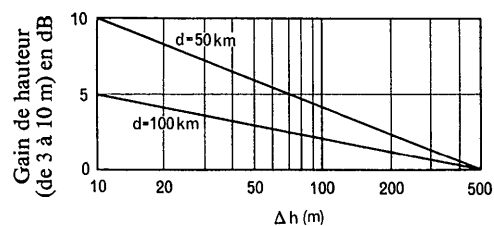


FIGURE 4

Facteur de gain de hauteur (de 3 à 10 m) en fonction de Δh pour des fréquences de 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V); d est la distance à l'émetteur

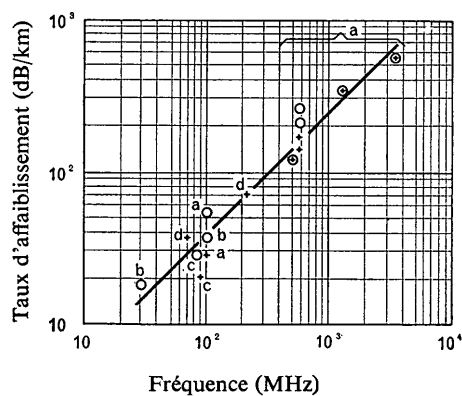


FIGURE 5

Affaiblissement dû aux bois ou aux broussailles en fonction de la fréquence

- (a) Arbres ayant toutes leurs feuilles [Saxton et Lane, 1953]
- (b) Bois avec broussaille dense [Josephson et Blomquist, 1958]
- (c) Jungle tropicale [Herbstreit et Crichlow, 1964]
- (d) Arbres ayant toutes leurs feuilles [LaGrone, 1953]
- Polarisation verticale
- + Polarisation horizontale

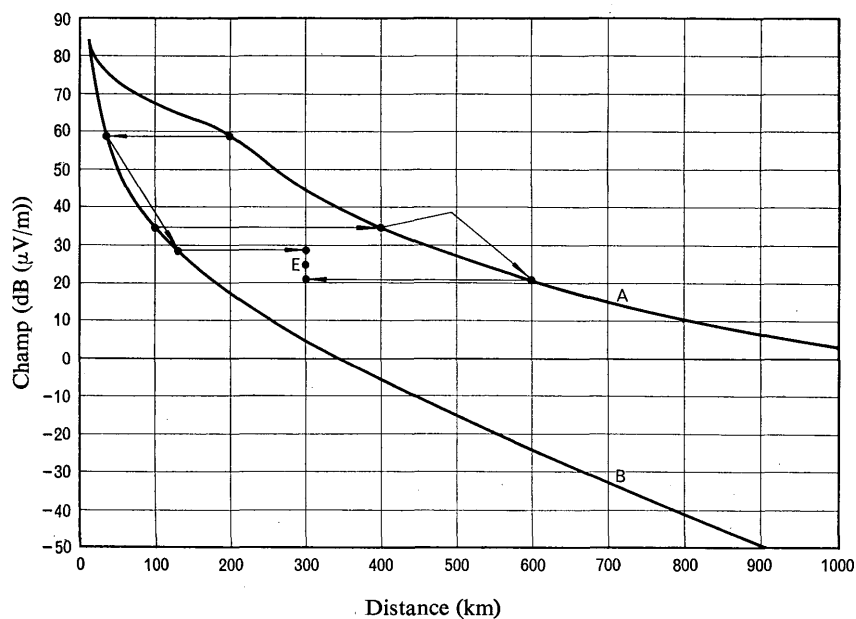


FIGURE 6

*Méthode permettant d'évaluer le champ sur un trajet mixte terrestre et maritime
(région de la mer du Nord)*

Courbe A: champ en fonction de la distance (1 % du temps) sur un trajet exclusivement maritime;
 $h = 300$ m

Courbe B: champ en fonction de la distance (1 % du temps) sur un trajet exclusivement terrestre;
 $h = 300$ m

E: champ estimé sur le trajet composé de deux tronçons, examiné dans le premier exemple du texte.
Les flèches représentent les différentes étapes de la méthode d'estimation

RAPPORT 424-1 *

**COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES,
DÉCIMÉTRIQUES ET CENTIMÉTRIQUES POUR LE SERVICE MOBILE
AÉRONAUTIQUE**

(Question 7/5)

(1970 – 1974)

1. Introduction

Le développement rapide et continu de l'aviation a conduit à penser que le C.C.I.R. devrait fournir des indications aux ingénieurs chargés des plans relatifs aux radiocommunications du service mobile aéronautique dans les diverses bandes de fréquences attribuées à ce service. Les courbes de propagation de l'Avis 370-2 ne conviennent pas aux besoins du service mobile aéronautique en raison du fait que les hauteurs des antennes sont plus grandes et les fréquences plus élevées. Le présent Rapport contient de nouvelles courbes spécialement tracées pour les besoins de ce service et propose que les administrations les appliquent et voient dans quelle mesure on peut les utiliser afin de déterminer, dans les études de brouillages, les valeurs du rapport signal utile/signal brouilleur. On parvient à éviter convenablement les brouillages au détriment des stations au sol ou des stations aéronautiques fonctionnant dans une même voie ou dans des voies adjacentes moyennant une séparation géographique judicieuse entre les stations aéronautiques au sol. L'emploi des courbes ci-annexées permet de résoudre cette question de façon très simple. Les administrations qui auraient étudié ces courbes pourraient envisager de préparer un Avis à ce sujet lors d'une assemblée ultérieure.

2. Elaboration des courbes

Les courbes ci-annexées sont le résultat condensé d'une analyse de plusieurs milliers d'enregistrements de stations du service mobile ainsi que de nombreuses valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission. Pour calculer les valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, on a utilisé les méthodes décrites en [NBS, 1967]. On a admis, dans ces calculs, que la Terre avait une surface régulière et que son coefficient de rayon équivalent était de 4/3. Les statistiques utilisées pour les évanouissements de puissance à long terme correspondent à un climat continental tempéré (voir le Rapport 233-3).

A l'exception d'une zone « voisine » de l'horizon radioélectrique, on a obtenu les valeurs de l'affaiblissement de transmission pour les trajets « en deçà de l'horizon » en ajoutant l'affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique (en décibels) à l'affaiblissement de transmission correspondant aux conditions d'espace libre. Pour la zone « voisine » de l'horizon radioélectrique, on a calculé les valeurs de l'affaiblissement de transmission selon les lois de l'optique géométrique, pour tenir compte de l'interférence entre le rayon direct et un rayon réfléchi à la surface de la Terre. On a raccordé les segments des courbes obtenues par ces deux méthodes de manière à constituer une courbe qui montre l'affaiblissement de transmission dans sa croissance uniforme avec la distance.

On ne devrait tenir aucun compte des valeurs d'affaiblissement de transmission apparaissant sur les courbes et inférieures à celles correspondant à la propagation en espace libre. On n'a pas fait un usage exclusif du modèle d'interférence à deux rayons pour les calculs en deçà de l'horizon, parce que la forme lobée qui résulte de ce modèle pour les trajets de courte longueur dépend beaucoup des caractéristiques de la surface du sol (tant de son irrégularité que de ses constantes électriques), des conditions atmosphériques (le rayon fictif de la Terre varie avec le temps) et des caractéristiques de l'antenne (polarisation, orientation et diagramme de directivité). Les courbes ainsi obtenues seraient souvent plus trompeuses qu'utiles, en ce sens que les détails de la forme lobée sont sous l'influence étroite de paramètres qu'il est difficile de déterminer avec une exactitude suffisante.

* Adopté à l'unanimité.

3. Description des courbes

Les courbes sont contenues dans les Fig. 1 à 5. Il convient de noter les points suivants:

- 3.1 Ces figures font connaître les valeurs médianes de l'affaiblissement de transmission de référence L_0 pour les fréquences 125, 300, 1600, 5100 et 15 500 MHz.
- 3.2 Ces figures donnent une moyenne de la différence entre le cas de la polarisation horizontale et de la polarisation verticale, à la fois pour les conditions d'un sol moyen et de l'eau de mer. La différence n'est discernable que sur la fréquence 125 MHz et pour des hauteurs d'antenne de 15 m et 15 m; elle ne dépasse pas ± 2 dB.
- 3.3 Le mille marin et le « foot » étant les unités de longueur couramment utilisées en aviation, ces unités ont servi de base pour la graduation des figures. Cependant, on a donné leurs correspondances dans le système métrique.
- 3.4 Les hauteurs d'antenne figurant en haut des figures vont de 15 à 18 300 m (50 à 60 000 feet) (il s'agit aussi bien des stations au sol que des aéronefs en vol). Au § 2 du Rapport 239-3, il est indiqué comment on doit procéder pour interpoler entre les hauteurs d'antenne données.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, révisée. Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.

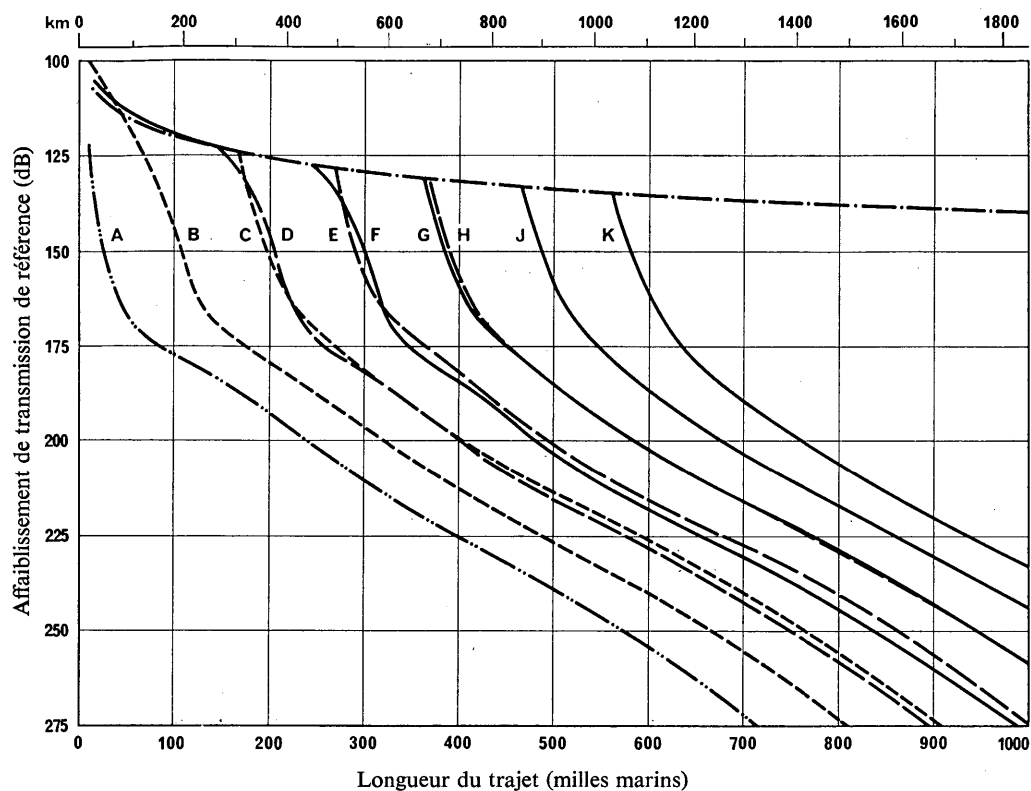


FIGURE 1

Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental

$N_s = 301$ ($d = 4/3$), $\Delta h = 0$, antennes isotropes, hauteurs H_1 et H_2 aux deux extrémités, comme indiqué
Fréquence: 125 MHz

H_1					
	m	feet		m	feet
A	15,2	50	F	15,2	50
B	15,2	50	G	1 524	5 000
C	1524	5000	H	7 620	25 000
D	15,2	50	J	7 620	25 000
E	1524	5000	K	18 300	60 000

H_2

———— 18 300 m (60 000 feet)

----- 7 620 m (25 000 feet)

----- 1 524 m (5 000 feet)

..... 15,2 m (50 feet)

..... Espace libre

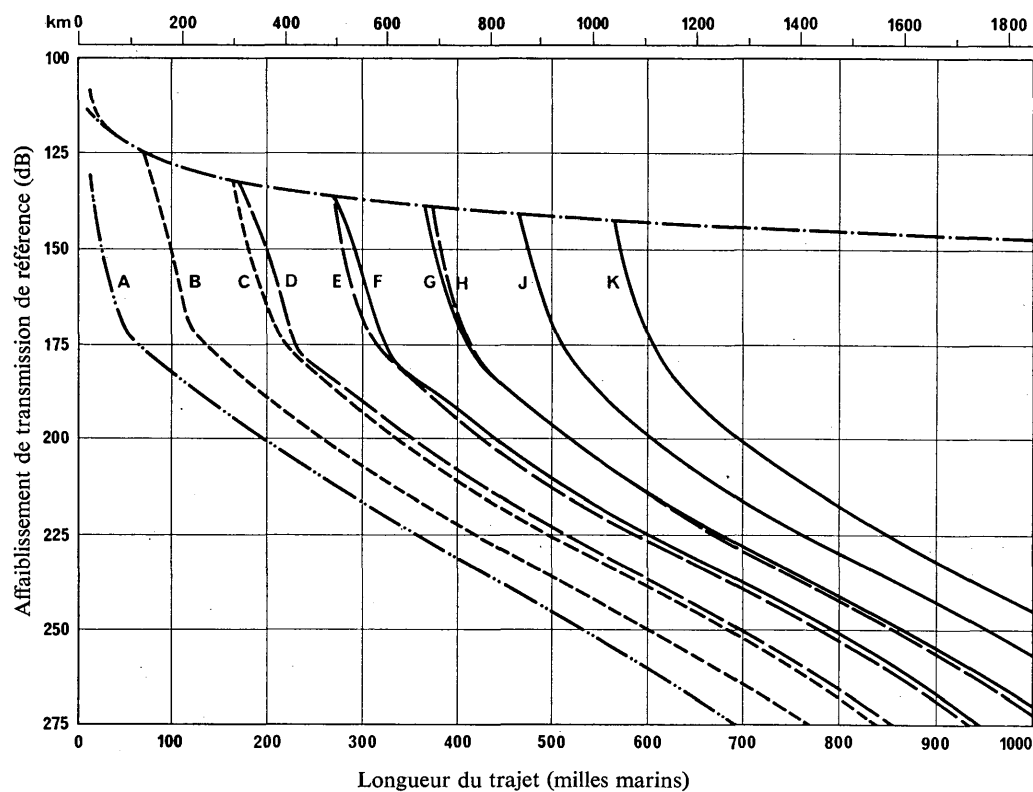


FIGURE 2

Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental

$N_s = 301$ ($d = 4/3$), $\Delta h = 0$, antennes isotropes, hauteurs H_1 et H_2 aux deux extrémités, comme indiqué
Fréquence: 300 MHz

H_1					
	m	feet		m	feet
A	15,2	50	F	15,2	50
B	15,2	50	G	1 524	5 000
C	1524	5000	H	7 620	25 000
D	15,2	50	J	7 620	25 000
E	1524	5000	K	18 300	60 000

H_2

————	18 300 m (60 000 feet)			Espace libre
-----	7 620 m (25 000 feet)			
-----	1 524 m (5 000 feet)			
.....	15,2 m (50 feet)			

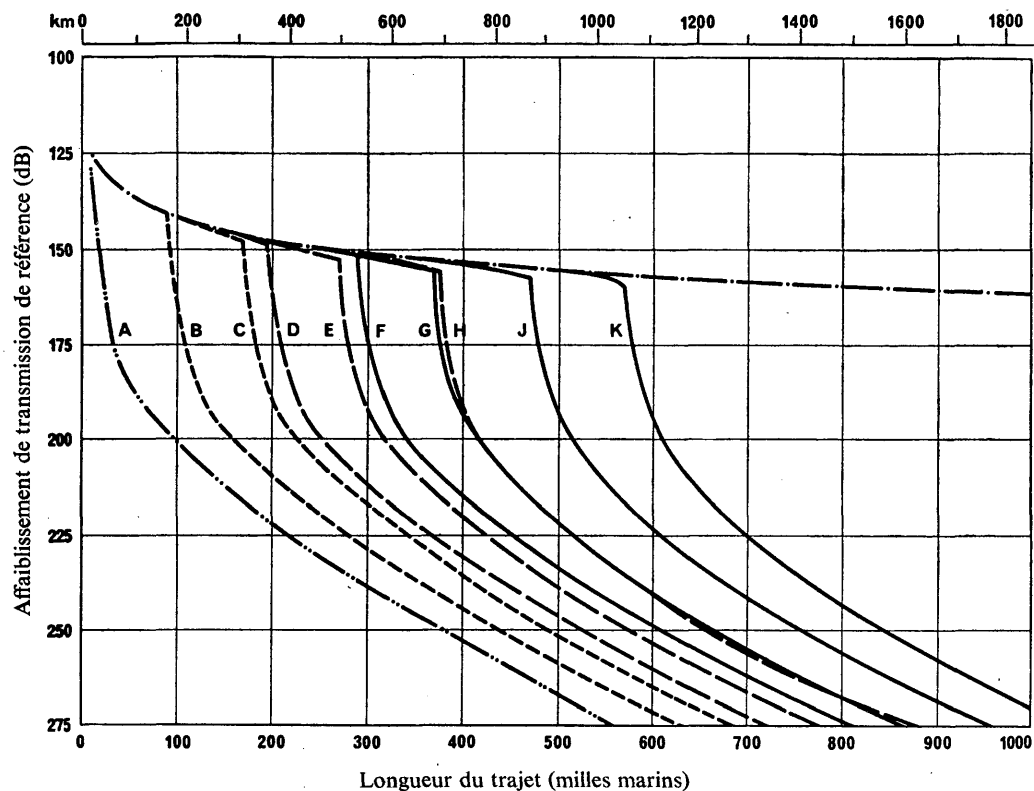


FIGURE 3

Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental
 $N_s = 301$ ($d = 4/3$), $\Delta h = 0$, antennes isotropes, hauteurs H_1 et H_2 aux deux extrémités, comme indiqué
 Fréquence: 1600 MHz

H_1					
	m	feet		m	feet
A	15,2	50	F	15,2	50
B	15,2	50	G	1 524	5 000
C	1524	5000	H	7 620	25 000
D	15,2	50	J	7 620	25 000
E	1524	5000	K	18 300	60 000

H_2			
————	18 300 m	(60 000 feet)	
-----	7 620 m	(25 000 feet)	 Espace libre
-----	1 524 m	(5 000 feet)	
-----	15,2 m	(50 feet)	

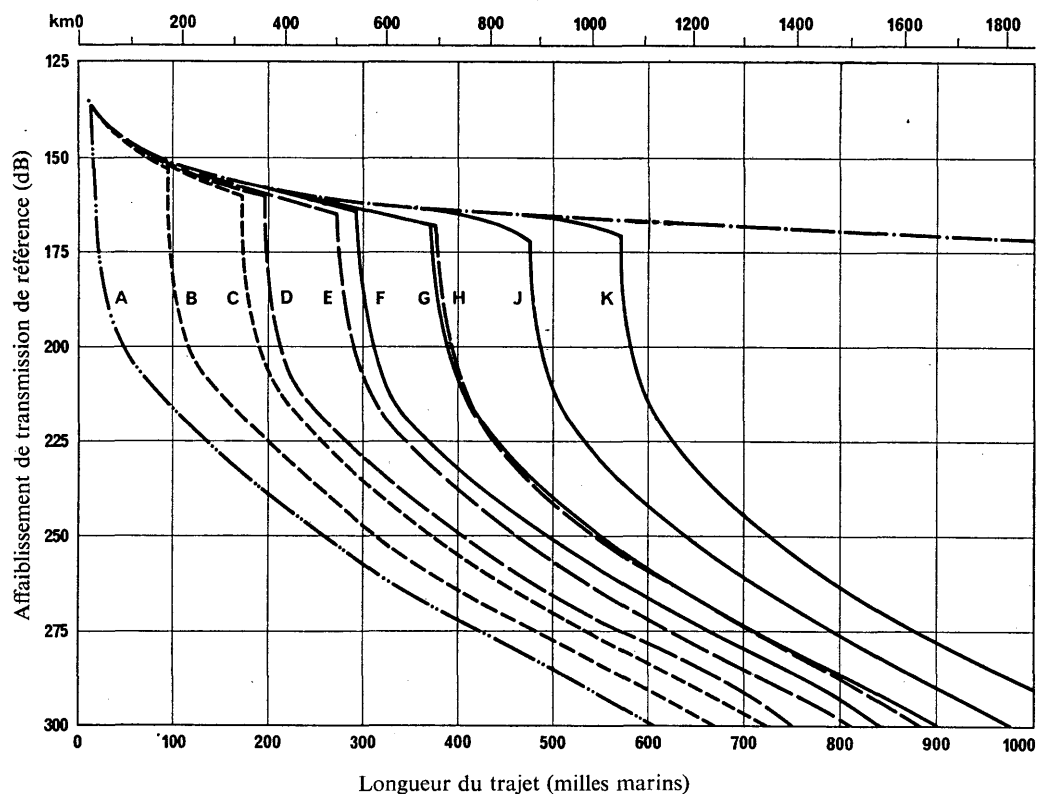


FIGURE 4

Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental
 $N_s = 301$ ($d = 4/3$), $\Delta h = 0$, antennes isotropes, hauteurs H_1 et H_2 aux deux extrémités, comme indiqué
 Fréquence: 5100 MHz

H_1					
	m	feet		m	feet
A	15,2	50	F	15,2	50
B	15,2	50	G	1 524	5 000
C	1524	5000	H	7 620	25 000
D	15,2	50	J	7 620	25 000
E	1524	5000	K	18 300	60 000

H_2

————	18 300 m (60 000 feet)	
-----	7 620 m (25 000 feet)	 Espace libre
-----	1 524 m (5 000 feet)	
.....	15,2 m (50 feet)	

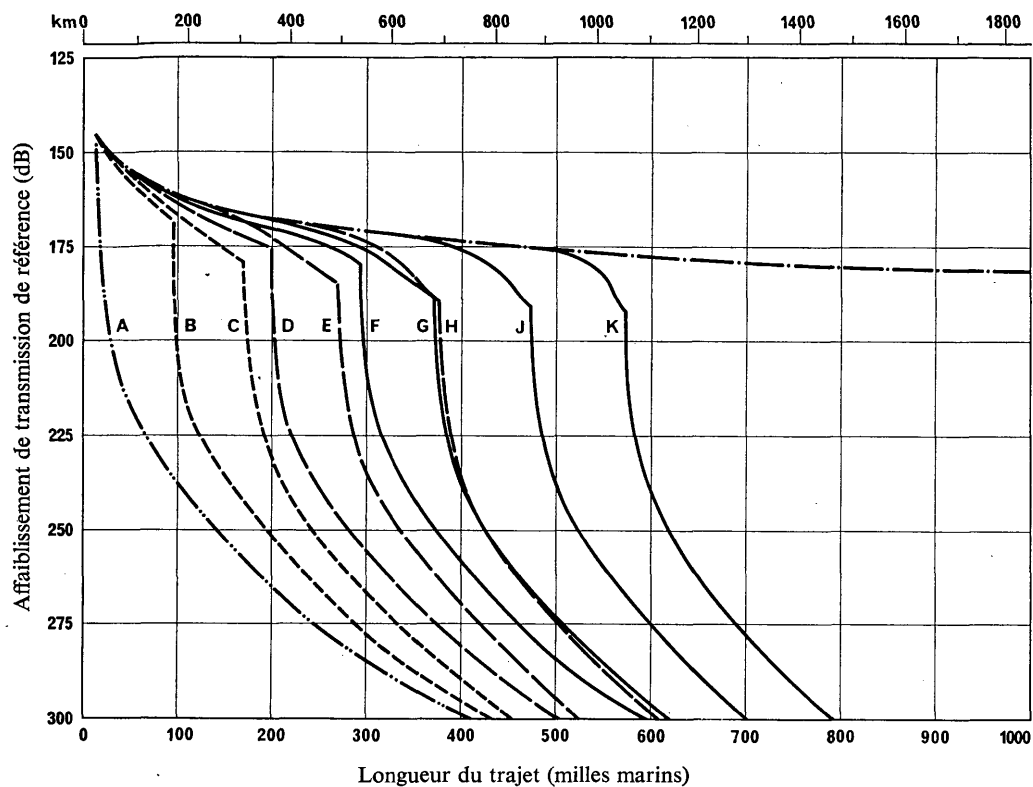


FIGURE 5

Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental

$N_s = 301$ ($d = 4/3$), $\Delta h = 0$, antennes isotropes, hauteurs H_1 et H_2 aux deux extrémités, comme indiqué
Fréquence: 15 500 MHz

H_1					
	m	feet		m	feet
A	15,2	50	F	15,2	50
B	15,2	50	G	1 524	5 000
C	1524	5000	H	7 620	25 000
D	15,2	50	J	7 620	25 000
E	1524	5000	K	18 300	60 000

H_2

— 18 300 m (60 000 feet)

— 7 620 m (25 000 feet)

— 1 524 m (5 000 feet)

— 15,2 m (50 feet)

— Espace libre

RAPPORT 425-1 *

ESTIMATION DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION
DANS LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE **Utilisation d'ordinateurs dans l'établissement de courbes de propagation
pour la radiodiffusion et les services mobiles

(Question 7/5)

(1970 – 1974)

1. On trouvera dans le présent Rapport l'indication de deux méthodes qui font appel à des ordinateurs pour estimer l'affaiblissement de transmission dans la propagation troposphérique au-dessus de terrains accidentés. Actuellement, la méthode A [Causebrook et Lee; Causebrook et autres, 1969] n'est utilisée que pour la radiodiffusion dans la bande 9 (ondes décimétriques), tandis que la méthode B [Longley et Rice, 1968] est destinée à une application beaucoup plus générale. Dans leurs domaines d'application et dans les études de grande envergure, les deux méthodes sont plus précises et donnent des résultats beaucoup plus rapidement que les courbes de propagation telles que celles de l'Avis 370-2 ou que les diverses méthodes graphiques d'estimation du champ. Dans les Fig. 1 et 2 on a comparé, pour la méthode A avec ordinateur et pour la « méthode de Stockholm » (sensiblement analogue à la méthode de l'Avis 370-2), la dispersion des valeurs du rapport (dB): champ calculé/champ mesuré, d'après des enregistrements, faits au Royaume-Uni, d'émissions de radiodiffusion dans la bande 9 (ondes décimétriques). Il faut souligner que la méthode A sert principalement à évaluer le champ pendant 1 % et 5 % du temps, pour donner une valeur du brouillage causé par des stations qui fonctionnent dans la même voie.

On trouvera ci-dessous une description résumée des deux méthodes, ainsi que des renseignements suffisants pour procéder, sans l'aide d'un ordinateur, aux calculs nécessaires dans le cas de la méthode A, bien que, même dans ce cas, on ait généralement recours à un ordinateur pour procéder rapidement aux calculs.

2. Méthode A

Les hauteurs de l'antenne aux deux extrémités du trajet h_1 et h_2 sont les hauteurs par rapport au niveau de la mer et l'analyse donnée ici ne s'applique qu'au type de terrains accidentés que l'on trouve en Europe septentrionale. La somme des distances à l'horizon (niveau de la mer) à partir de l'antenne d'émission et à partir du récepteur s'appelle « distance combinée à l'horizon ». Elle est donnée par la formule $d_h = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ où d est exprimé en kilomètres, h en mètres et en supposant des conditions normales de réfraction.

En vue de déterminer le champ E_T lorsque T est égal à 50 %, à 5 % ou à 1 % du temps, on utilise, compte tenu de la valeur de d_h , la courbe appropriée des Fig. 3, 4, 5 et 6. Les Fig. 3, 4 et 5 sont applicables à un trajet entièrement terrestre et la Fig. 6 à un trajet entièrement maritime. Dans le cas d'un trajet mixte (terrestre et maritime), il convient de connaître la proportion de trajet maritime et de procéder à une interpolation entre les valeurs obtenues pour le trajet terrestre et pour le trajet maritime. Le facteur d'interpolation A est linéaire dans les limites de la distance à l'horizon; au-delà de l'horizon, pour des pourcentages de temps de 1 % et de 5 %, le facteur d'interpolation est déterminé à partir de la Fig. 7. Pour définir la valeur du champ sur un trajet mixte, on évaluera la différence de champ entre un trajet entièrement maritime et un trajet entièrement terrestre et on multipliera la valeur obtenue par le facteur d'interpolation; la nouvelle valeur sera ajoutée à celle du trajet entièrement terrestre. On obtiendra ainsi le champ requis sur le trajet mixte terre/mer:

$$E_T = E_{L,T} + A (E_{S,T} - E_{L,T})$$

* Adopté à l'unanimité.

** Note 1. — Ces méthodes sont particulièrement utiles pour les liaisons en visibilité directe ou pour les liaisons qui utilisent la propagation par diffraction, mais ne peuvent être utilisées pour les liaisons entre points fixes qui dépassent la zone de diffraction.

Note 2. — Ce Rapport ne tient pas compte de tous les paramètres météorologiques décrits dans le Rapport 233-3.

La valeur de E_T est bien entendu applicable aux trajets où aucun obstacle majeur ne se dresse entre l'émetteur et le récepteur. Pour tenir compte des affaiblissements dus aux « obstacles » situés à moins de 16 km de chaque station terminale, on appliquera un facteur de correction de terrain aux valeurs de E_T pour obtenir le champ reçu pour le trajet donné. Pour ce faire, on calculera, pour chaque antenne, l'angle formé par l'horizontale et la droite au-dessous de laquelle se trouvent tous les obstacles situés dans un rayon de 16 km à partir de l'antenne dans la direction du trajet. Ces angles de dégagement sont représentés à la Fig. 8 (angles θ_1 et θ_2); ils doivent être mesurés à l'aide de cartes topographiques.

Pour des trajets moins longs que d_h , l'angle à mesurer est celui qui détermine si le trajet se trouve ou non en « visibilité optique ». L'angle en question s'appelle « angle redéfini »; c'est l'angle de dégagement par rapport à la droite reliant les antennes d'émission et de réception et *non* par rapport à l'horizontale. Les symboles θ_1 et θ_2 sont alors remplacés par les symboles α_1 et α_2 et on calcule l'angle de dégagement sous réserve de connaître la valeur de h_1 , h_2 et d , au moyen de la Fig. 10. On se souviendra, en utilisant la Fig. 10, que h_1 représente toujours la hauteur de l'antenne à l'extrémité pour laquelle on désire connaître « l'angle redéfini » et que a , b) etc., représentent les échelles par ordre d'utilisation.

Ayant obtenu les valeurs des angles de dégagement, on tire de la Fig. 9 la valeur de la correction de terrain (dB) à chaque extrémité du trajet, valeur que l'on ajoute à la valeur de E_T déterminée pour un terrain non accidenté. On obtient ainsi le champ pour le pourcentage de temps requis.

On retranche de cette dernière valeur un facteur de correction de 10 dB si l'emplacement de réception se trouve dans une zone bâtie. Cette correction est à apporter aux valeurs obtenues pour toutes les installations domestiques de réception de télévision dans les zones en question.

3. Méthode B

Pour adapter la méthode B [Longley et Rice, 1968] à différents types de service, il suffit de considérer, pour les paramètres fondamentaux, les gammes de valeurs qui correspondent normalement aux services dont il s'agit. La méthode peut être employée avec les profils complets du terrain pour des trajets réels; si ces profils ne sont pas connus ou sont inapplicables (par exemple en radiodiffusion ou dans le service mobile), on peut utiliser des profils représentatifs d'un terrain « médian » et de caractéristiques atmosphériques médianes dans une zone donnée.

La Fig. 11 contient une comparaison entre des courbes de propagation établies selon les méthodes A et B, pour le cas particulier d'une fréquence de 700 MHz et $d_{Ls} = 40$ et 80 km; ce paramètre est égal à la somme des distances à l'horizon sur une terre non accidentée, pour des hauteurs équivalentes d'antenne h_{e1} et h_{e2} exprimées en mètres:

$$d_{Ls} = 4,1 (\sqrt{h_{e1}} + \sqrt{h_{e2}}) \text{ km} \quad (1)$$

Les deux valeurs choisies pour d_{Ls} dans la Fig. 11 correspondent approximativement aux combinaisons suivantes de hauteurs équivalentes d'antenne: 10 m, 37,5 m et 10 m, 300 m. Dans cet exemple, on n'a pas tenu compte du facteur « urbain » pour la méthode A, afin de faciliter la comparaison entre les deux méthodes.

Si l'on connaît parfaitement le profil du terrain pour un trajet déterminé, on peut évaluer un « affaiblissement de référence calculé », A_{cr} , qui s'exprime en décibels au-dessous du champ ou de l'affaiblissement de transmission en espace libre. Cette évaluation se fait sur la base des paramètres suivants:

- longueur du trajet de propagation, d , (km). Voir la Fig. 12;
- fréquence radioélectrique, f , (MHz);
- hauteurs équivalentes des antennes, h_{e1} et h_{e2} . Ces hauteurs sont définies en [Causebrook et Lee] et [Longley et Rice, 1968]. Pour une antenne dont le centre de rayonnement est voisin du sol (de 0,5 à 20 m), h_e est normalement égal à la hauteur au-dessus du niveau du sol, h_a . Dans les autres cas, il est courant de définir la hauteur équivalente par la hauteur au-dessus du niveau de la mer, au-dessus du terrain moyen ou au-dessus d'un plan donnant une réflexion dominante;
- conductivité σ et constante diélectrique ϵ équivalentes de la surface (terre ou plan d'eau);
- coïndice de l'atmosphère au voisinage de la surface, N_s (voir le Rapport 233-3);
- rayon terrestre équivalent, a , ou $a(N_s)$, qui est une fonction de N_s [Longley et Rice, 1968];

- polarisation électrique, horizontale ou verticale;
- distances effectives de l'horizon, d_{L1} et d_{L2} . Voir la Fig. 12;
- la somme, θ_e , des angles de site de l'horizon pour les antennes, θ_{e1} et θ_{e2} , au-dessus de l'horizontale à l'emplacement de chaque antenne, Fig. 12. Ces angles peuvent être positifs ou négatifs;
- un paramètre Δh , qui tient compte des accidents de terrain dans un type de terrain particulier, ou un paramètre $\Delta h(d)$, qui tient compte des accidents de terrain sur toute la longueur, d , d'un trajet de propagation. Ce paramètre fait intervenir à la fois l'irrégularité (essentiellement pour la probabilité de grands angles de diffraction ou de diffusion) et les accidents de terrain, auxquels correspond le paramètre Δh qui est défini dans l'Avis 370-2. Le nouveau paramètre, $\Delta h(d)$, représente l'intervalle interdécile des hauteurs de terrain (mètres) au-dessus et au-dessous de la pente moyenne du terrain, pour un trajet donné de longueur d kilomètres. L'intervalle interdécile est égal à la différence entre a) les hauteurs dépassées par 10 % des collines et b) les creux dépassés par 10 % des vallées. Supposons qu'une des antennes ou que les deux antennes se déplacent, ou que l'on désire obtenir une valeur typique de l'affaiblissement de transmission pour des antennes placées dans une zone déterminée. Dans ces conditions, les données à l'entrée de l'ordinateur, ou les courbes de propagation fournies par celui-ci, correspondent à la valeur médiane $\Delta h_m(d)$ pour une série de trajets pris au hasard dans la zone considérée, tous ces trajets ayant une longueur d . En étudiant plusieurs centaines de profils dans des types de terrain différents, on a constaté que, lorsque la distance augmente, $\Delta h_m(d)$ atteint un maximum Δh :

$$\Delta h = \Delta h_m(d) / [1 - 0,8 \exp(-0,02d)] \text{ mètres} \quad (2)$$

Lorsque la distance tend vers 150 km et lorsqu'elle dépasse cette valeur, l'expression (2) montre que $\Delta h_m(d)$ atteint la valeur constante Δh qui, dans la méthode B, sert à caractériser le terrain. Les valeurs $\Delta h = 50, 100, 200$ et 500 mètres correspondent respectivement à un terrain non accidenté, à un terrain assez peu accidenté, à un terrain très vallonné et à un terrain extrêmement irrégulier.

Les données à appliquer à l'entrée de l'ordinateur peuvent être les quatre premiers des paramètres ci-après, ou la totalité de ces paramètres: $d, f, h_{g1}, h_{g2}, h_{e1}, h_{e2}, \sigma, \epsilon, N_s, a, d_{L1}, d_{L2}, \theta_e, \Delta h(d), \Delta h$ et polarisation. Si l'on utilise seulement les quatre premiers paramètres, il importe dans certains cas de préciser la polarisation et d'indiquer si l'un des trajets ou un groupe de trajets est terrestre ou maritime. De toute façon, le programme utilisé actuellement donne des valeurs moyennes ou des valeurs représentatives de tous les paramètres qui ne sont pas spécifiés, sauf pour les quatre premiers qui doivent être spécifiés.

Dans [Longley et Rice, 1968], on a comparé des résultats obtenus avec des valeurs calculées selon cette méthode, pour des hauteurs d'antenne très petites, des distances courtes et pour la fréquence 100 MHz. Les premiers de ces résultats correspondent à des valeurs médianes pour un certain nombre de profils de terrain; ils représentent à peu de choses près les valeurs auxquelles on pourrait s'attendre pour des emplacements « médians » et pour chaque distance. Pour obtenir des estimations médianes (temps et emplacements) de l'affaiblissement de transmission pour les distances les plus grandes — distances pour lesquelles les effets atmosphériques introduisent normalement des écarts pouvant aller jusqu'à 100 dB entre les médianes horaires maximale et minimale mesurées au cours d'une année — on utilise des courbes qui passent à travers les résultats existants. La Fig. 13 représente, pour différents groupements de ces résultats, la dispersion des rapports (dB): valeurs calculées/valeurs mesurées de l'affaiblissement de transmission, sur la base de calculs effectués selon la méthode B.

Les méthodes A et B ont des caractéristiques telles que les programmes d'ordinateur correspondants devraient se révéler utiles dans toutes les études de cette nature. La méthode A est plus spécialement utile dans le calcul du champ pour de petits pourcentages de temps; il convient d'y recourir pour calculer les brouillages dans une même voie, en ondes décimétriques. La méthode B, quant à elle, est plus ambitieuse et plus complexe; elle s'appuie davantage sur la théorie et peut être adaptée à un plus grand nombre de paramètres et à une gamme plus étendue de données. Comme pour la méthode A, on ajoute un facteur correctif de 10 dB à l'affaiblissement de transmission calculé lorsqu'on utilise la méthode B si le site de réception est dans une zone très construite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAUSEBROOK, J.H. et LEE, R.W. Calculation of the field strength required for a television service, in the presence of co-channel interfering signals, Part 1. B.B.C. Res. Rep. No. RA - 12/1 and Technical Memorandum No. RA-1015.

CAUSEBROOK, J.H., DAVIS, B. et SANDELL, R.S. [1969] The prediction of co-channel interference to television broadcasting services in the frequency range 470-960 MHz. B.B.C. Research Department, Report 1969/33.

LONGLEY, A.G. et RICE, P.L. [1968] Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method — ESSA, U.S. Department of Commerce, Tech. Report, ERL 79/ITS 67.

BIBLIOGRAPHIE

NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, révisée. Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.

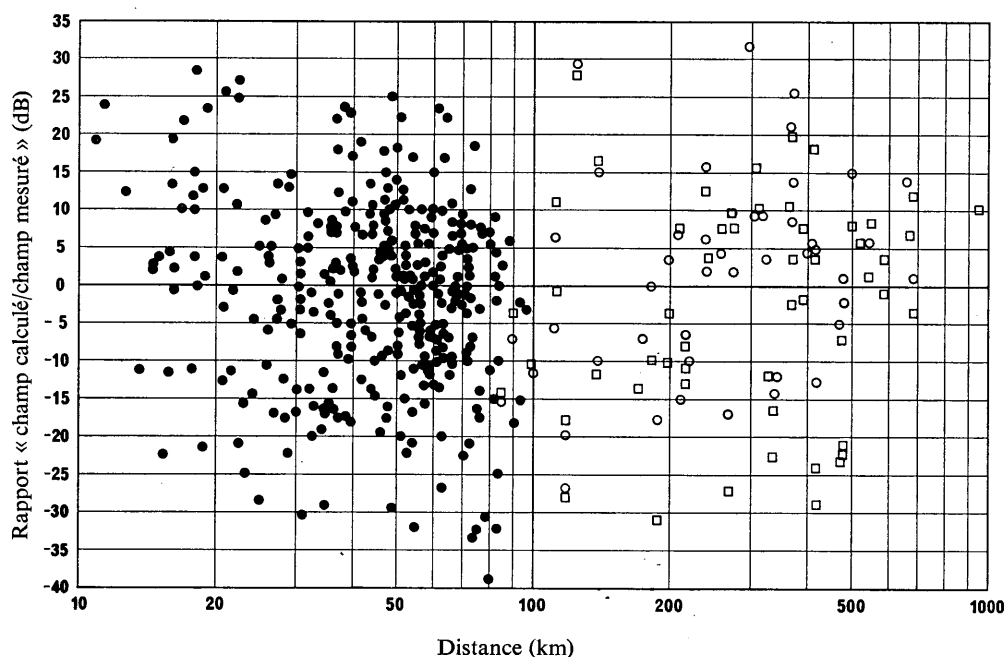


FIGURE 1

Représentation du rapport « champ calculé/champ mesuré » en fonction de la distance en radiodiffusion sur ondes décimétriques

Calcul selon la « méthode de Stockholm »

- = 50 % du temps
- = 10 % du temps
- = 1 % du temps

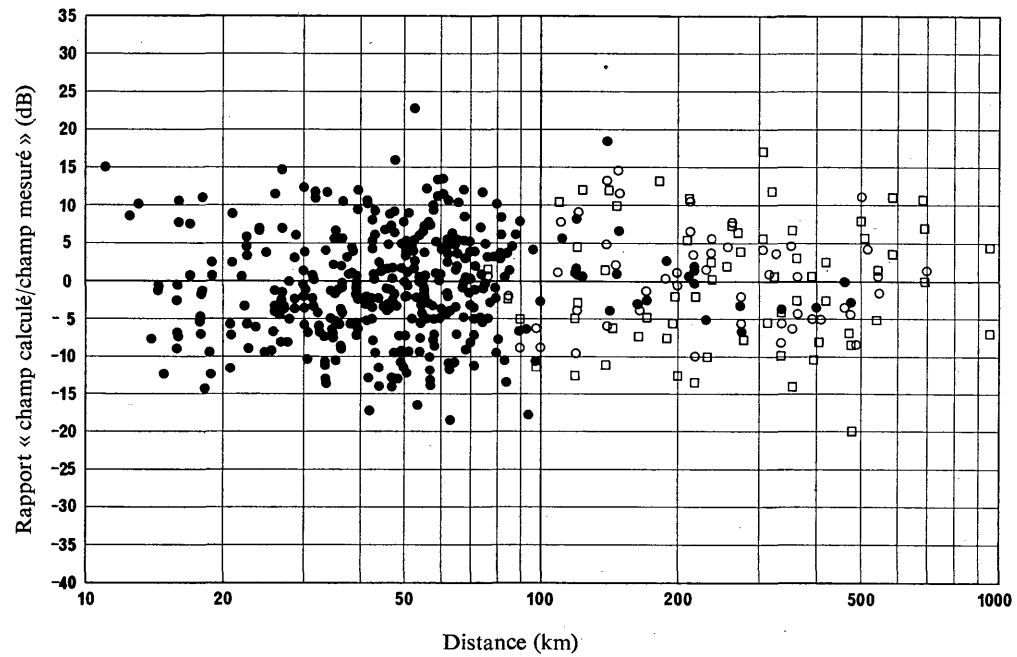


FIGURE 2

Représentation du rapport « champ calculé/champ mesuré » en fonction de la distance en radiodiffusion sur ondes décimétriques

Calcul à l'ordinateur selon la « méthode A »

- = 50 % du temps
- = 5 % du temps
- = 1 % du temps

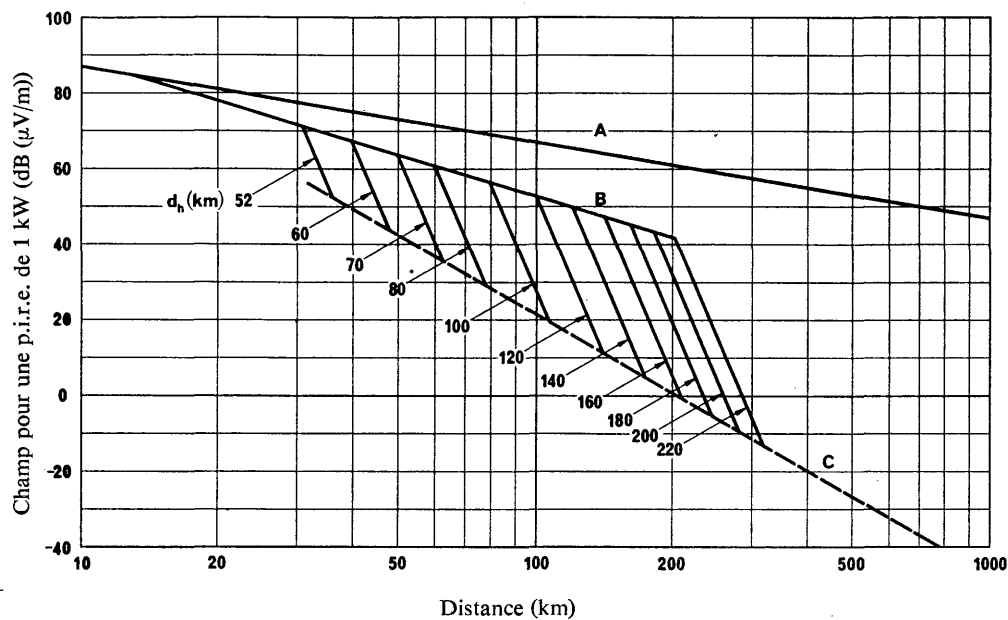


FIGURE 3

Champ en fonction de la distance — Trajet terrestre: 50 % du temps

Courbes A: Espace libre

B: En deçà de l'horizon

C: Au-delà de l'horizon

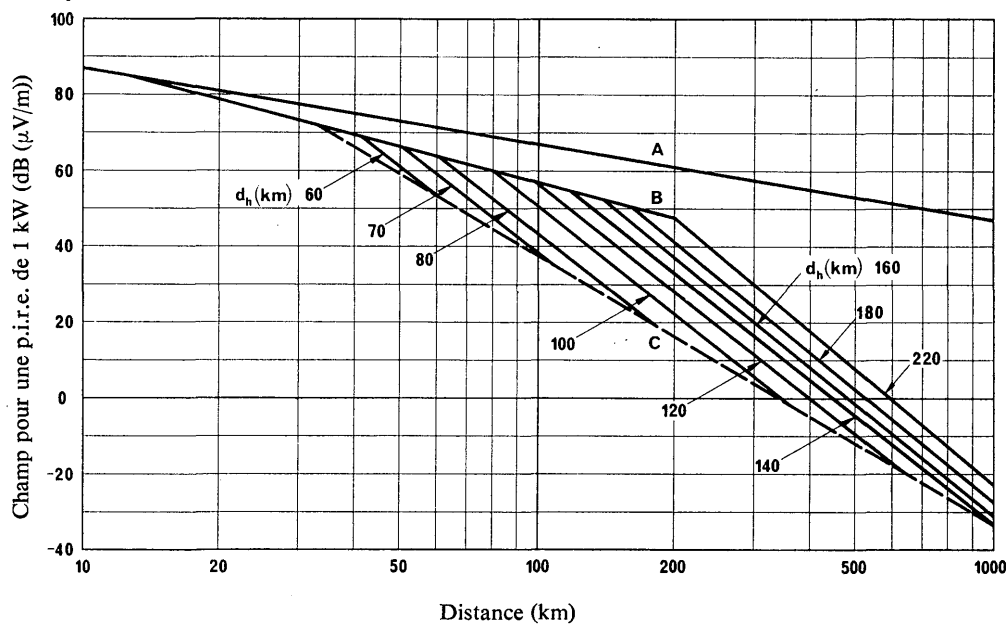


FIGURE 4

Champ en fonction de la distance — Trajet terrestre: 1 % du temps

Courbes A: Espace libre

B: En deçà de l'horizon

C: Au-delà de l'horizon

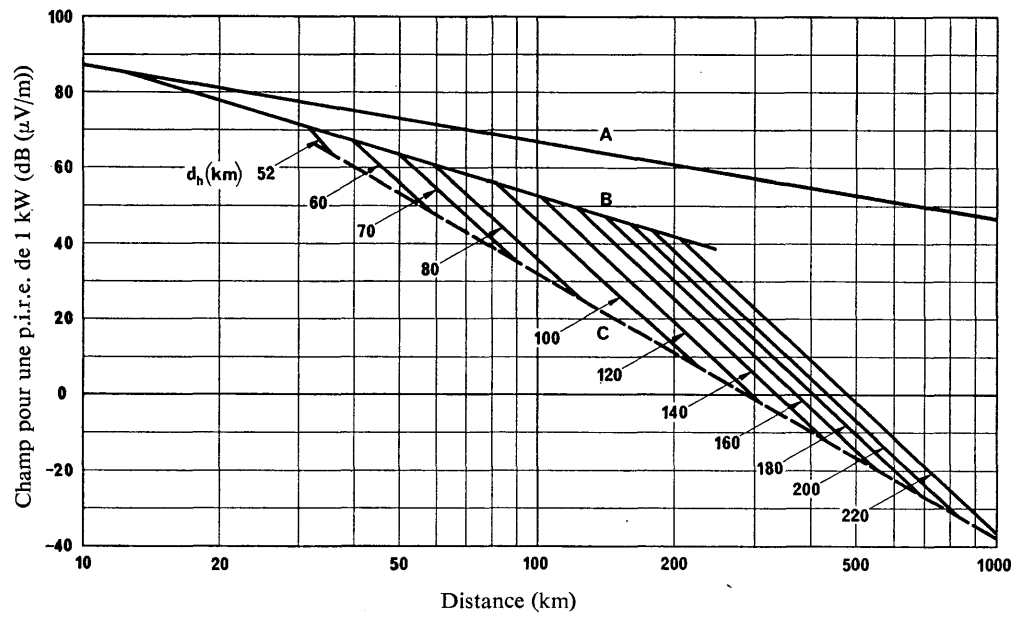


FIGURE 5

Champ en fonction de la distance — Trajet terrestre: 5% du temps

Courbes A: Espace libre

B: En deçà de l'horizon

C: Au-delà de l'horizon

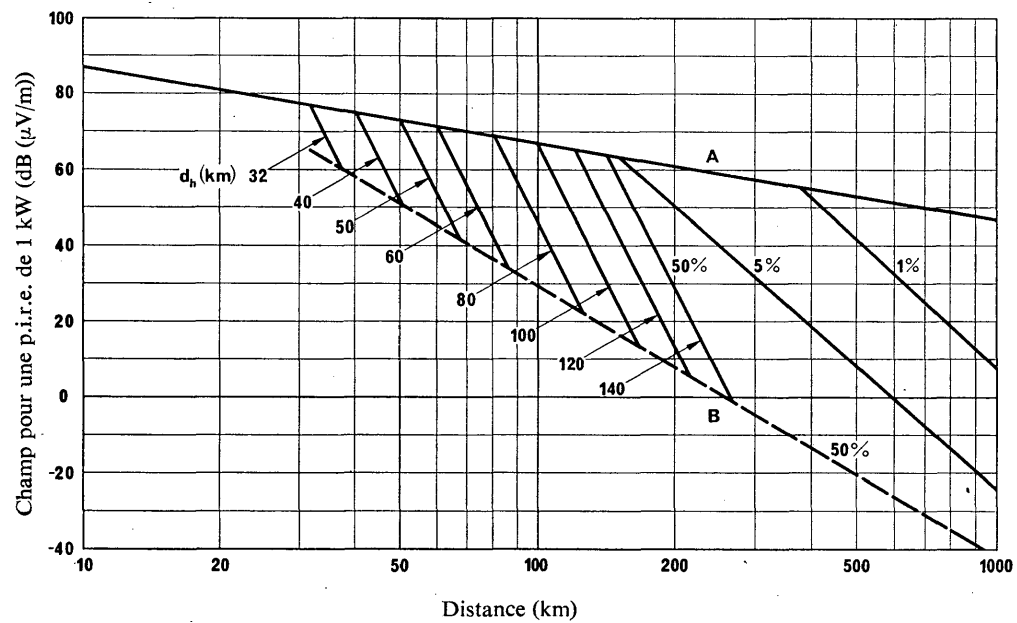


FIGURE 6

Champ en fonction de la distance — Trajet maritime

Courbes A: Espace libre

B: Au-delà de l'horizon

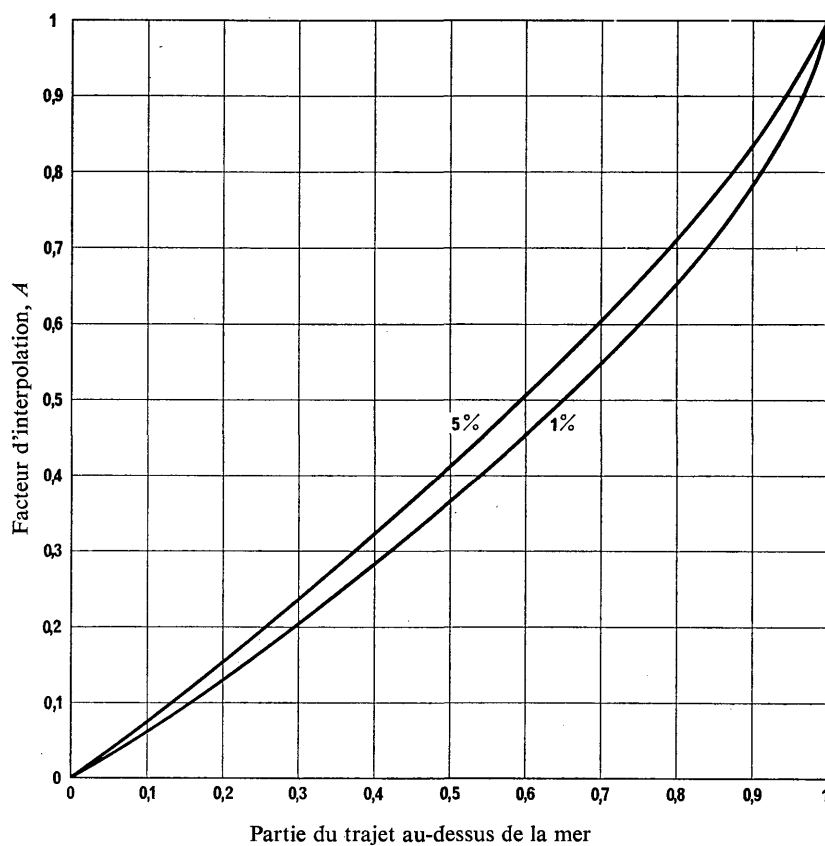


FIGURE 7

Interpolation pour des trajets mixtes terre-mer

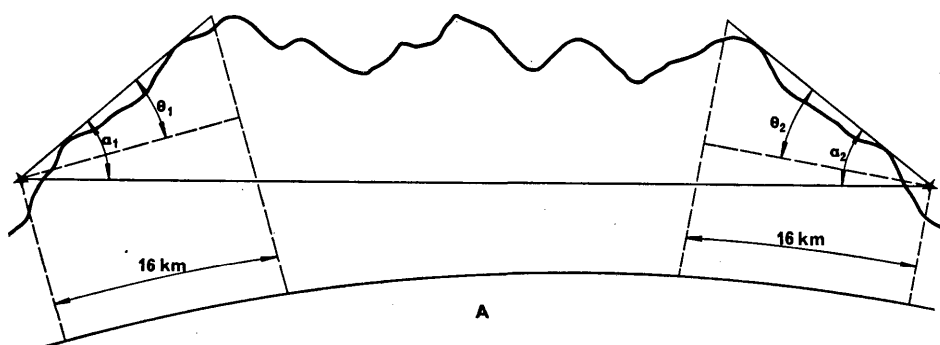


FIGURE 8

Géométrie du trajet:

A = Niveau de la mer

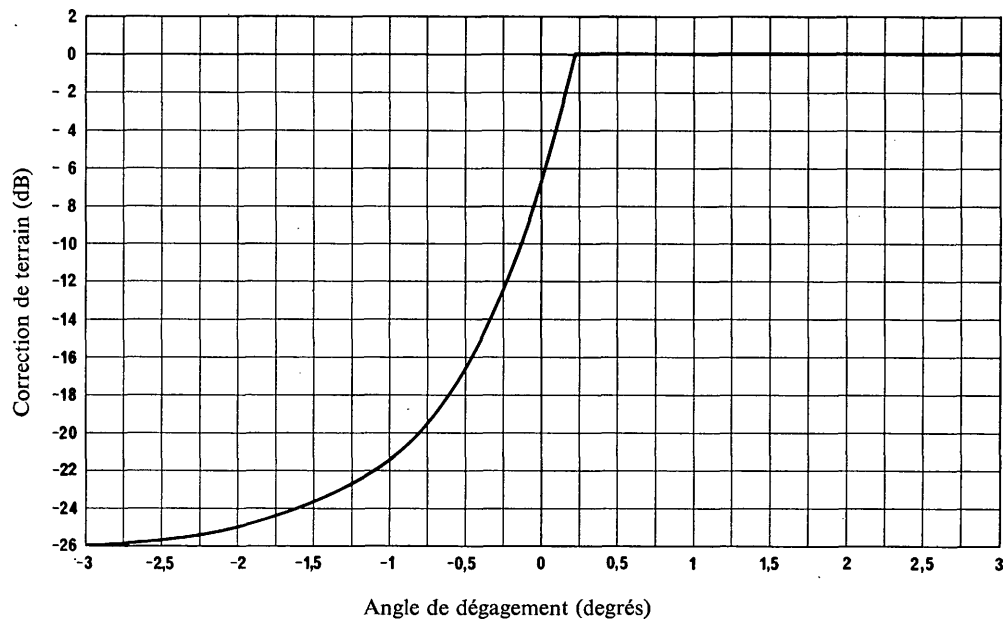


FIGURE 9

Correction de terrain

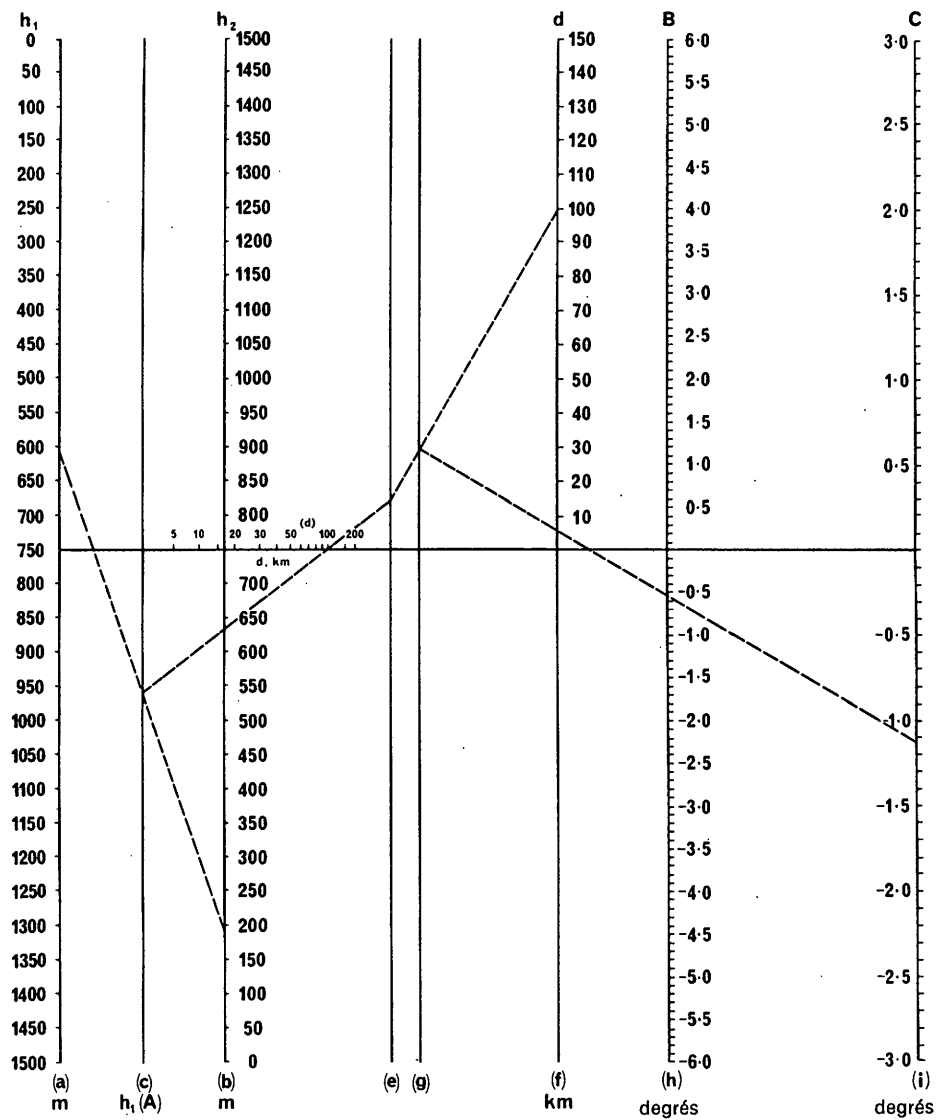


FIGURE 10

Nomogramme pour « l'angle redéfinition »

A: Hauteur à l'extrémité à « redéfinir »

B: Angle de dégagement du terrain (en degrés à partir de l'horizontale)

C: « angle redéfinition » α

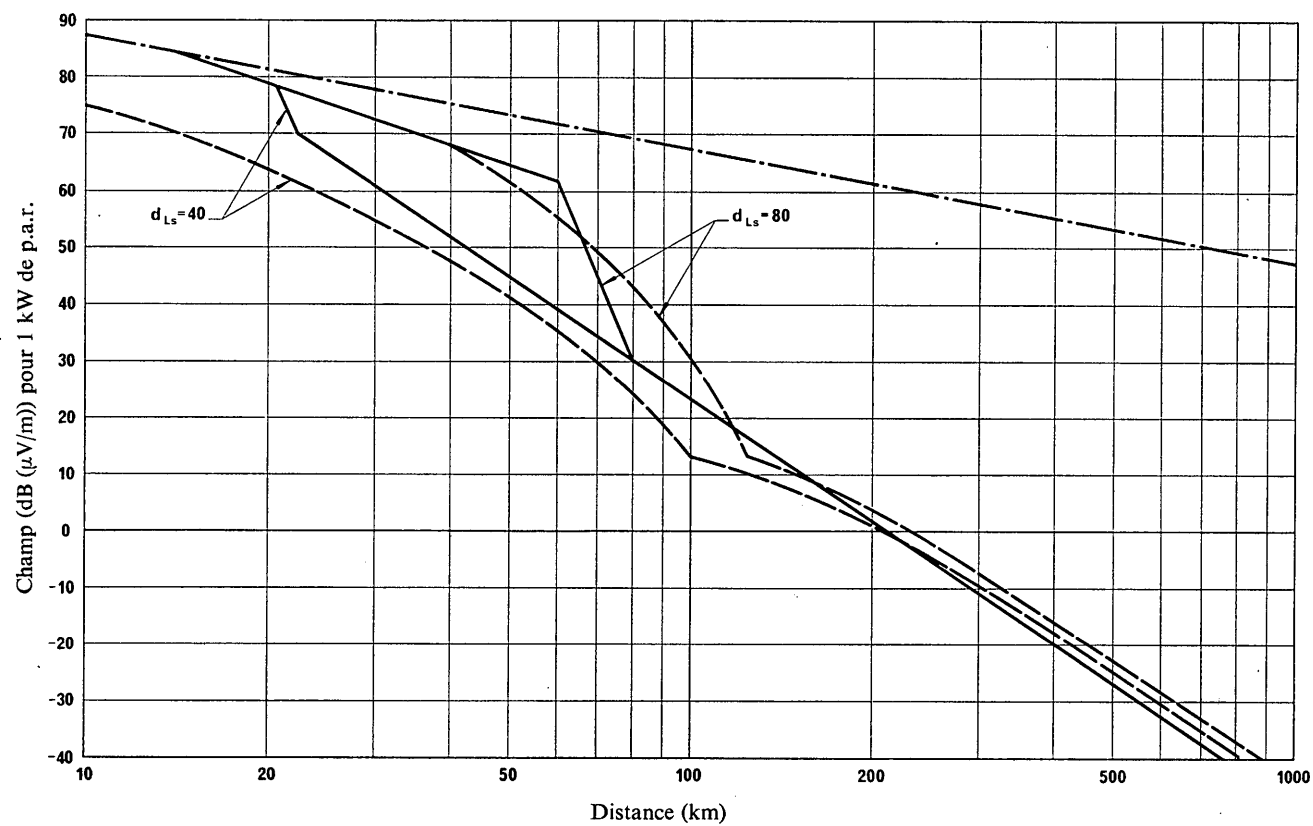


FIGURE 11

Graphiques représentant le champ calculé en radiodiffusion sur ondes décimétriques –
Comparaison entre les calculs à l'ordinateur selon les méthodes A et B

— · — · — Espace libre
— Méthode A
— — — Méthode B

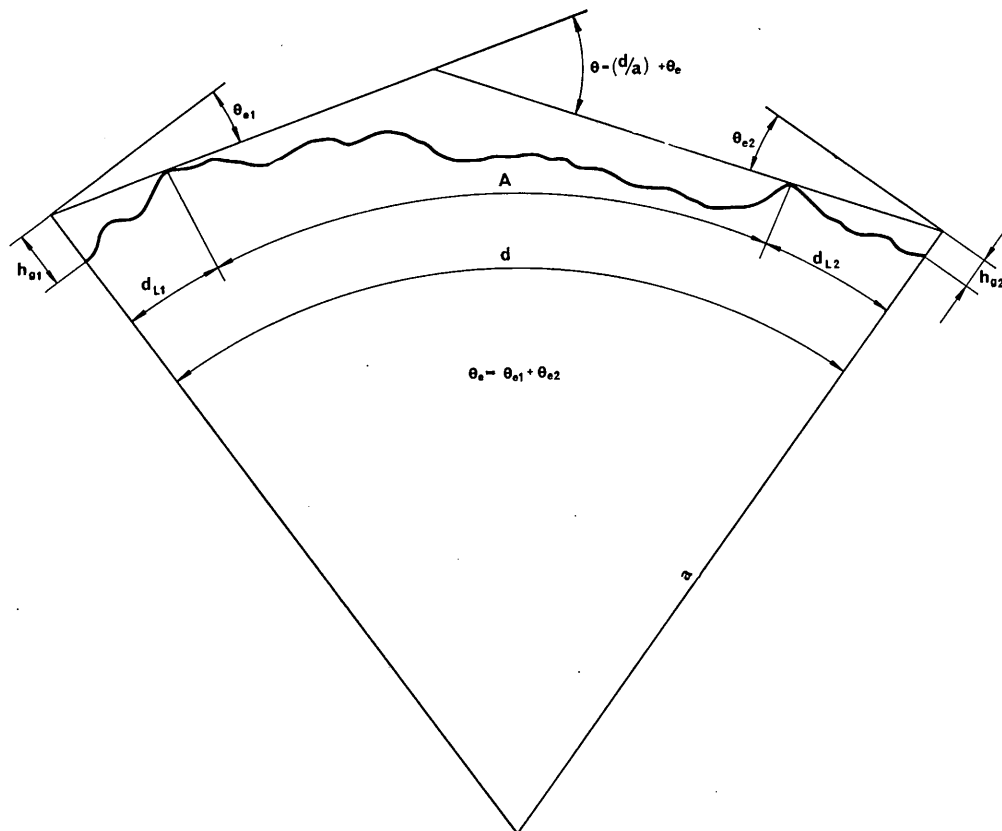


FIGURE 12

Géométrie d'un trajet radioélectrique transhorizon

A: Niveau de la mer

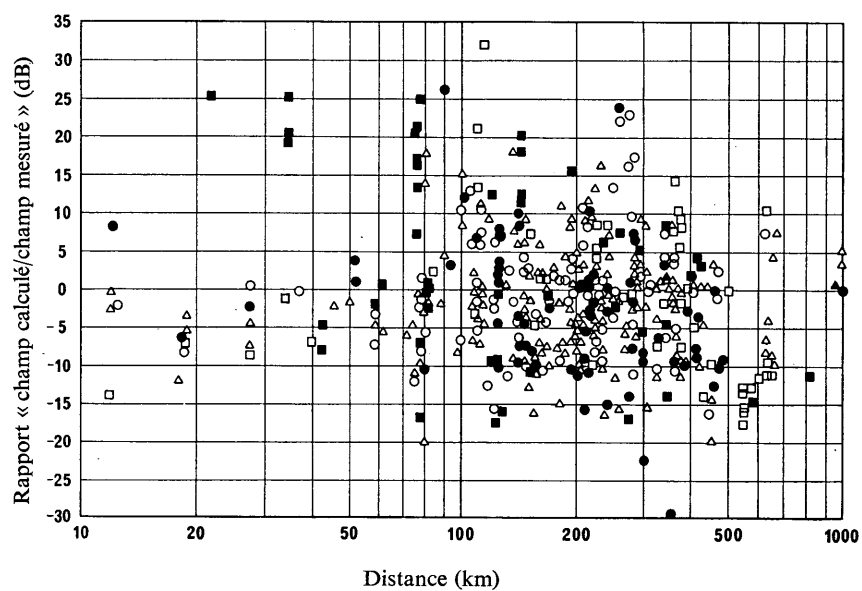


FIGURE 13

Représentation du rapport « champ calculé/champ mesuré » en fonction de la distance

(Calcul à l'ordinateur selon la « Méthode B »)

Fréquence (MHz):

- △ <110;
- 110 à 299;
- 300 à 699;
- 700 à 1100;
- >1100;

$N = 780$

RAPPORT 562 *

**DONNÉES DE PROPAGATION POUR LA RADIODIFFUSION SONORE
ET LA TÉLÉVISION DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz****Service de radiodiffusion de Terre à 12 GHz**

(Programme d'études 7B/5)

(1974)

1. Introduction

En raison de la demande croissante de réseaux de radiodiffusion dans les bandes inférieures à 1 GHz, il est nécessaire d'envisager l'utilisation de fréquences supérieures à 10 GHz, notamment dans la bande des 12 GHz, pour la radiodiffusion sonore et la télévision.

Le présent Rapport contient une description très préliminaire des effets de propagation qui présentent de l'importance dans la planification des réseaux utilisant la bande des 12 GHz. On y trouvera les résultats de mesures effectuées en République Fédérale d'Allemagne [Sakowski, 1970 a et b].

2. Considérations générales**2.1 Propagation dans la zone de service**

L'élément le plus important dont il convient de tenir compte dans la planification d'un système de radiodiffusion est la probabilité de couverture, qui est tributaire de l'affaiblissement dû à la diffraction par le terrain. Dans les bandes supérieures à 10 GHz, l'affaiblissement dû à la diffraction par les bâtiments acquiert une importance particulière.

Il convient de tenir compte également de l'affaiblissement par les précipitations et de celui dû à la propagation par trajets multiples. Les mesures faites en République Fédérale d'Allemagne indiquent que dans les régions très urbanisées les effets de trajets multiples dus à la réflexion sur les couches atmosphériques sont d'une importance secondaire, alors que la propagation par trajets multiples due à la réflexion sur les bâtiments élevés et d'autres accidents de terrain est un facteur qui mérite une attention particulière. La directivité relativement forte des antennes de réception utilisées pour les liaisons dans cette bande constitue peut-être un remède à ces difficultés.

2.2 Brouillage entre stations

Les caractéristiques de propagation dans cette bande de fréquences sont telles que la zone effectivement desservie par chaque émetteur est peu étendue, de sorte que pour assurer la probabilité de couverture nécessaire, il faudra sans doute prévoir une grande densité d'émetteurs. Il importe par conséquent d'évaluer l'espacement minimal entre émetteurs fonctionnant dans le même canal. Cette estimation ne devrait pas être fondée uniquement sur un calcul des valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission, mais il ne faut pas négliger non plus les conditions de transmission anormales dans lesquelles le niveau du signal subit, pendant de faibles pourcentages de temps, un renforcement important sur de grandes distances.

3. Données de propagation**3.1 Propagation dans la zone de service**

On a effectué en République Fédérale d'Allemagne [Sakowski, 1970b] des mesures de champ au moyen d'un réseau expérimental de Berlin, comportant trois émetteurs dont les antennes avaient des hauteurs équivalentes différentes.

* Adopté à l'unanimité.

Ces mesures indiquent que pour remédier aux effets d'obstruction des bâtiments, il faut déterminer avec soin la hauteur des antennes. Comme la relation entre la valeur du champ et la hauteur de l'antenne dépend dans une large mesure des diverses hauteurs des bâtiments d'une agglomération urbaine, ces mesures n'ont pas permis de formuler des conclusions générales. *

Dans cette expérience, l'utilisation possible de trois émetteurs a permis d'évaluer l'avantage que présenterait une couverture triple. Elle a montré que, sur un terrain relativement plat comme celui de la zone étudiée, le service assuré par un seul émetteur dont l'antenne est située à 200 m au-dessus du sol, est à peine moins satisfaisant que si on assure une couverture triple, cette dernière solution étant peu rentable tant du point de vue du coût des émetteurs que du point de vue de l'utilisation des fréquences.

Pour estimer, de manière générale, l'affaiblissement par les précipitations, on se rapportera au Rapport 233-3. Lors des expériences susmentionnées, on a fait pendant un an des mesures continues de l'affaiblissement sur un trajet de 18 km [Sakowski, 1971].

3.2 Propagation à grande distance

Le Rapport 569 et la référence [NBS, 1967] contiennent la description de méthodes de calcul du champ ou de l'affaiblissement de transmission sur les distances qui entrent en ligne de compte pour l'évaluation des probabilités de brouillage. Pour la planification d'un réseau à 12 GHz, on s'intéresse plus particulièrement aux distances inférieures à 300 km environ.

Une comparaison des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1970-1974] avec les prévisions fondées sur [NBS, 1967] a montré que la diminution du champ en fonction de la distance est moins sensible que prévu.

4. Conclusions

Ce Rapport récapitule les résultats préliminaires de mesures du champ faites dans un réseau expérimental à 12 GHz.

Il est évident qu'il faudra recueillir un grand nombre de données supplémentaires pour constituer une base valable en vue de la planification des réseaux de radiodiffusion dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- C.C.I.R. [1970 - 1974] Doc. 5/6, Allemagne (République Fédérale d').
 NBS [1967] National Bureau of Standards Technical Note No. 101, Révisée, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
 SAKOWSKI, K. [décembre 1970a] Mesure du champ sur le réseau expérimental de Berlin à 12 GHz. Techn. Ber. FTZ, A44 TBr 22.
 SAKOWSKI, K. [décembre 1970b] Probabilité des emplacements des émetteurs à 12 GHz dans le réseau expérimental de Berlin. Techn. Ber. FTZ, A44 TBr 23.
 SAKOWSKI, K. [mars 1971] Enregistrement du champ à 12 GHz dans une région urbaine. Techn. Ber. FTZ, A44 TBr 24.

* Les mesures ont été faites dans une ville où les toits des bâtiments se trouvent approximativement à la même hauteur.

RAPPORT 565 *

DONNÉES SUR LA PROPAGATION POUR LA RADIODIFFUSION PAR SATELLITE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz

(Programme d'études 7B/5)

(1974)

1. Introduction

Les problèmes que pose la radiodiffusion par satellite ne sont pas tout à fait les mêmes que ceux que l'on rencontre dans le service fixe par satellite. On a besoin de données sur l'affaiblissement sous la forme de moyennes statistiques pour de vastes régions. Quelques renseignements peuvent être extraits du Rapport 234-3. Des problèmes particuliers peuvent se présenter à la limite de la zone de service et aussi dans le cas de coordination entre les systèmes de radiodiffusion par satellite d'une part et ceux du service fixe de Terre ou spatial d'autre part. L'objet du présent Rapport est de rassembler des données destinées à faciliter la planification des systèmes de radiodiffusion par satellite.

2. Affaiblissement dû aux précipitations et aux gaz de l'atmosphère

A l'initiative de l'Organisation Européenne de Recherches Spatiales (CERS/ESRO) ** [C.C.I.R., 1970-1974], une série de mesures radiométriques a été effectuée en Europe pendant une période de deux ans. Les résultats semblent utiles, au moins dans les parties européennes de la Région 1. Ils sont résumés dans le Tableau I ci-dessous, qui donne les valeurs de l'affaiblissement atmosphérique à 11,5 GHz.

TABLEAU I

Affaiblissement atmosphérique à 11,5 GHz

Angle de site (en degrés)	Affaiblissement qui n'est pas dépassé	
	pendant 99 % du mois le plus défavorable (dB)	pendant 99,9 % du mois le plus défavorable (dB)
5	6,1	13,0
10	4,2	8,7
15	2,9	6,6
20	2,2	5,7
25	1,9	5,1
30	1,6	4,8
35	1,5	4,5
40	1,4	4,4

Pour toute autre fréquence f , comprise entre 11,0 et 14,5 GHz, l'affaiblissement atmosphérique $A(f)$ peut se déduire de la valeur de $A(11,5)$ par la formule:

$$A(f) = A(11,5) [1 + 0,2 (f - 11,5)] \text{ avec } f \text{ en GHz}$$

On trouvera dans le Rapport 564 d'autres renseignements sur l'évaluation de l'affaiblissement atmosphérique sur des trajets obliques, pour toutes les régions du monde.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

C.C.I.R. [1970 - 1974] Doc. 5/189, U.E.R.

* Adopté à l'unanimité.

** Maintenant, l'Agence spatiale européenne.

RAPPORT 567 *

**COURBES DE PROPAGATION ET STATISTIQUES
POUR LE SERVICE MOBILE TERRESTRE FONCTIONNANT DANS LES BANDES
COMPRISES ENTRE 30 MHz ET 1 GHz**

(Programme d'études 7E/5)

(1974)

1. Introduction

On peut utiliser les courbes de propagation de l'Avis 370-2 pour faire des calculs de brouillage concernant le service mobile terrestre, à condition d'appliquer les corrections appropriées pour tenir compte du fait que les antennes d'émission et de réception convenant pour ce service sont moins hautes. Les résultats de mesure obtenus dans des conditions qui s'appliquent au service mobile terrestre sont à employer lorsqu'on en possède.

Le présent Rapport contient des courbes de propagation pour les fréquences comprises entre 100 et 250 MHz, qui ont été tracées d'après celles de l'Avis 370-2 en utilisant, pour les antennes de moindre hauteur, des fonctions expérimentales du gain de hauteur comme celles qui sont indiquées au § 2 du présent Rapport. Deux autres séries de courbes de propagation sont extraites d'une publication japonaise [C.C.I.R., 1970-1974].

On pourra trouver des renseignements supplémentaires dans le Rapport 239-3. Des méthodes faisant appel à l'ordinateur pour estimer le champ ou l'affaiblissement de transmission sont exposées dans le Rapport 425-1.

2. Effets d'une variation de la hauteur de l'antenne d'une station mobile

Les courbes de champ de l'Avis 370-2 sont directement applicables aux services dans lesquels l'antenne de réception se trouve à une hauteur de 10 m au-dessus du sol. Dans le service mobile terrestre, l'antenne d'une station mobile se trouve généralement plutôt à une hauteur d'environ 3 m au-dessus du sol ou moins, et le champ reçu est, en conséquence, réduit.

Les travaux de différentes administrations [Uhlen, 1962; Králík et autres, 1962; Kinase 1969; Okumara et autres, 1968; C.C.I.R., 1970-1974; Ogulewicz, 1971] indiquent le gain de hauteur qu'on peut espérer obtenir en portant la hauteur de l'antenne de 3 à 10 m au-dessus du sol. Les facteurs de correction (en dB) à soustraire des courbes de l'Avis 370-2 pour une hauteur d'antenne réduite à 3 m sont indiqués dans le Tableau I. Les courbes qui figurent dans le présent Rapport ont déjà été corrigées pour 3 m ou 1,50 m respectivement.

TABLEAU I

	Bandes I, II	Bande III	Bandes IV, V
Zone rurale (dB)	9	7	Valeur donnée par la Fig. 4 du Rapport 239-3 pour $d < 50$ km
Zone urbaine (dB)	9	11	14

Les valeurs ci-dessus sont valables pour les distances inférieures ou égales à 50 km. Pour les distances supérieures à 100 km, il faut les diminuer de moitié. Pour les distances intermédiaires, il convient de procéder à une interpolation linéaire.

* Adopté à l'unanimité.

Des mesures faites au Japon ont montré que le gain de hauteur de 1,5 à 3 m, pour la bande des ondes décimétriques dans les zones urbaines, est de 3 dB [Okumara et autres, 1968]. On peut ajouter cette valeur au facteur de correction indiqué dans le Tableau I pour évaluer le champ médian, dans les bandes IV et V, dans le cas d'antennes de réception se trouvant à une hauteur de 1,5 m dans les zones urbaines.

Des mesures de champ faites dans des régions rurales de la République Populaire de Pologne sur des fréquences comprises entre 34 et 306 MHz ont donné des résultats tout à fait conformes aux courbes de propagation de l'Avis 370-2, compte tenu des effets du terrain [C.C.I.R., 1966-1969a]. Des mesures faites dans la même gamme de fréquences mais dans des zones urbaines montrent que la dispersion des valeurs du champ semble être pratiquement indépendante de la fréquence [C.C.I.R., 1966-1969b].

3. Phénomènes de dépolarisation

On définit le facteur de dépolarisation comme le rapport de l'amplitude de la composante à polarisation orthogonale, produite par un certain mécanisme de propagation, à l'amplitude de l'onde plane initiale polarisée. Pour les systèmes du service mobile terrestre, il est parfois plus commode de considérer la discrimination de polarisation que l'on obtient avec une antenne de réception fonctionnant dans son environnement normal. En règle générale, la discrimination de polarisation est exprimée en dB et, dans la pratique, elle est de signe opposé mais de valeur égale au facteur de dépolarisation à condition que ce dernier ne soit pas trop petit.

On a mesuré en Suède la dépolarisation dans le cas où les deux antennes sont placées à une faible hauteur (< 10 m). Ces mesures ont montré que le facteur de dépolarisation augmente en même temps que la fréquence; il passe de -18 dB environ pour 35 MHz à -7 dB environ pour 950 MHz [Blomquist, 1965].

Le facteur de dépolarisation obéit à une répartition log-normale, avec un écart type qui dépend quelque peu de la fréquence. Dans la gamme de fréquences 30 à 1000 MHz, la valeur moyenne de la différence entre les valeurs à 10 % et à 90 % est de l'ordre de 15 dB. On n'a observé qu'une légère différence entre le cas où la polarisation initiale est verticale et le cas où cette polarisation est horizontale.

On a constaté que la dépolarisation varie avec le temps suivant deux modes différents. Il peut y avoir une variation lente provoquée par une modification des caractéristiques électriques du sol, en liaison avec les conditions météorologiques. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence est plus basse. L'autre mode de variation de la dépolarisation avec le temps résulte du mouvement des arbres, qui donne un phénomène d'évanouissement par dépolarisation, dont l'amplitude atteint plusieurs décibels, même pour des vents de vitesse très modérée.

4. Affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments

Il convient de se référer au § 4.4 du Rapport 239-3 pour les problèmes d'affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments.

Il convient également de consulter le Rapport 229-2 pour ce qui concerne l'affaiblissement supplémentaire en terrain boisé en fonction de la fréquence.

Il convient de tenir compte de la distribution de probabilité des emplacements indiquée dans le § 4.1 du Rapport 239-3 bien que l'écart type de cette distribution puisse être légèrement différent de celui qui est obtenu dans le cas de la radiodiffusion où les antennes de réception ont une plus grande hauteur.

5. Courbes de champ pour les ondes métriques et décimétriques

Les Fig. 1, 2 et 3 donnent les courbes de propagation pour les fréquences comprises entre 100 et 250 MHz pour une hauteur d'antenne de la station mobile de 3 m et pour des hauteurs d'antenne de stations fixes comprises entre 10 m et 600 m, en zone rurale, en 50 % des emplacements et pendant 50 %, 10 % et 1 % du temps.

Les Fig. 4 et 5 donnent les courbes pour 450 et 900 MHz, pour une hauteur d'antenne de station mobile de 1,5 m et pour des hauteurs d'antenne de stations fixes comprises entre 30 et 1000 m, en 50 % des emplacements et pendant 50 % du temps.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLOMQUIST, A. [1965] Depolarization of radio-waves in terrain. Res. Instit. of National Defence, Stockholm, Report A648.
- C.C.I.R. [1966 – 1969a] Doc. V/137, République Populaire de Pologne.
- C.C.I.R. [1966 – 1969b] Doc. V/136, République Populaire de Pologne.
- C.C.I.R. [1970 – 1974] Doc. 5/26, Royaume-Uni.
- KINASE, A. [mars 1969] Influence of terrain irregularities and environmental clutter surroundings on the propagation of broadcasting waves in the UHF and VHF bands. N.H.K. Technical Monograph, 14, Japon.
- KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [1962] Ausbreitung von Dezimeterwellen bei horizontaler und vertikaler Polarisation und Höhenabhängigkeit der Feldstärke im Gebirge (Propagation des ondes décimétriques en polarisations horizontale et verticale, et variation du champ en fonction de la hauteur en terrain montagneux). *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, 4, 162-166.
- OGULEWICZ, S. [1971] Propagation en ondes décimétriques dans les zones urbaines. *Prace Instytutu Łączności*, Vol. XVIII, 4 (64) (en polonais) – Un résumé de cet article a été présenté dans le Doc. C.C.I.R. 5/81, République Populaire de Pologne 1970 – 1974.
- OKUMARA, Y. et autres [septembre-octobre 1968] Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Review of Electrical Communication Laboratory*, Japon, Vol. 16, 9-10.
- UHLEN, N. [1962] *Tele I*. Fältstyrkemätningar och räckviddsbestämning för radioanläggningar (Mesures du champ et calculs de la gamme de couverture pour stations radioélectriques (en suédois)).

BIBLIOGRAPHIE

- C.C.I.R. [1966 – 1969] Doc. V/160, République Fédérale d'Allemagne.



Fréquence ≈ 150 MHz — Terre — zone rurale — 50% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 3$ m

. — . — . — . propagation en espace libre

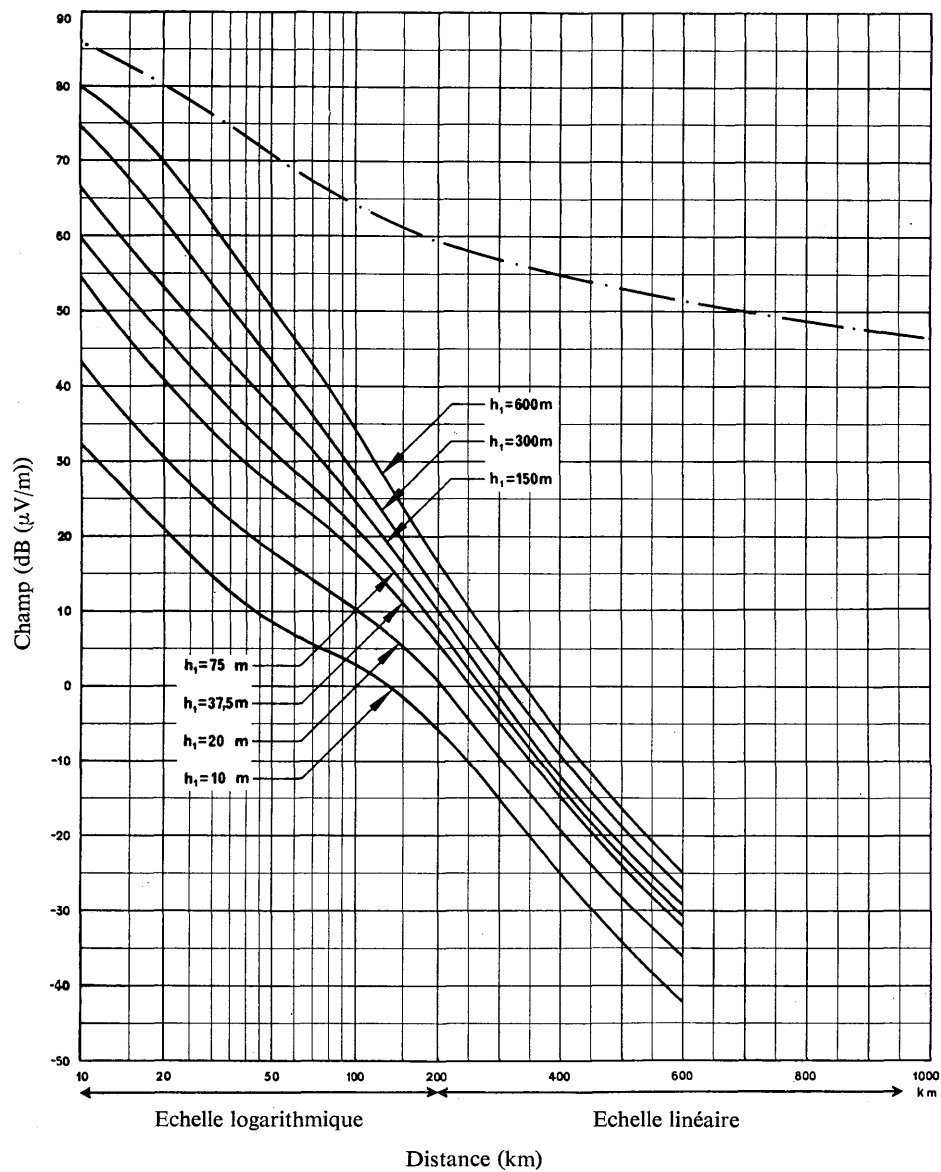


FIGURE 2

Champ (dB ($\mu V/m$)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW

Fréquence ≈ 150 MHz — Terre — zone rurale — 10% du temps —
50% des emplacements — $h_2 = 3$ m

..... propagation en espace libre

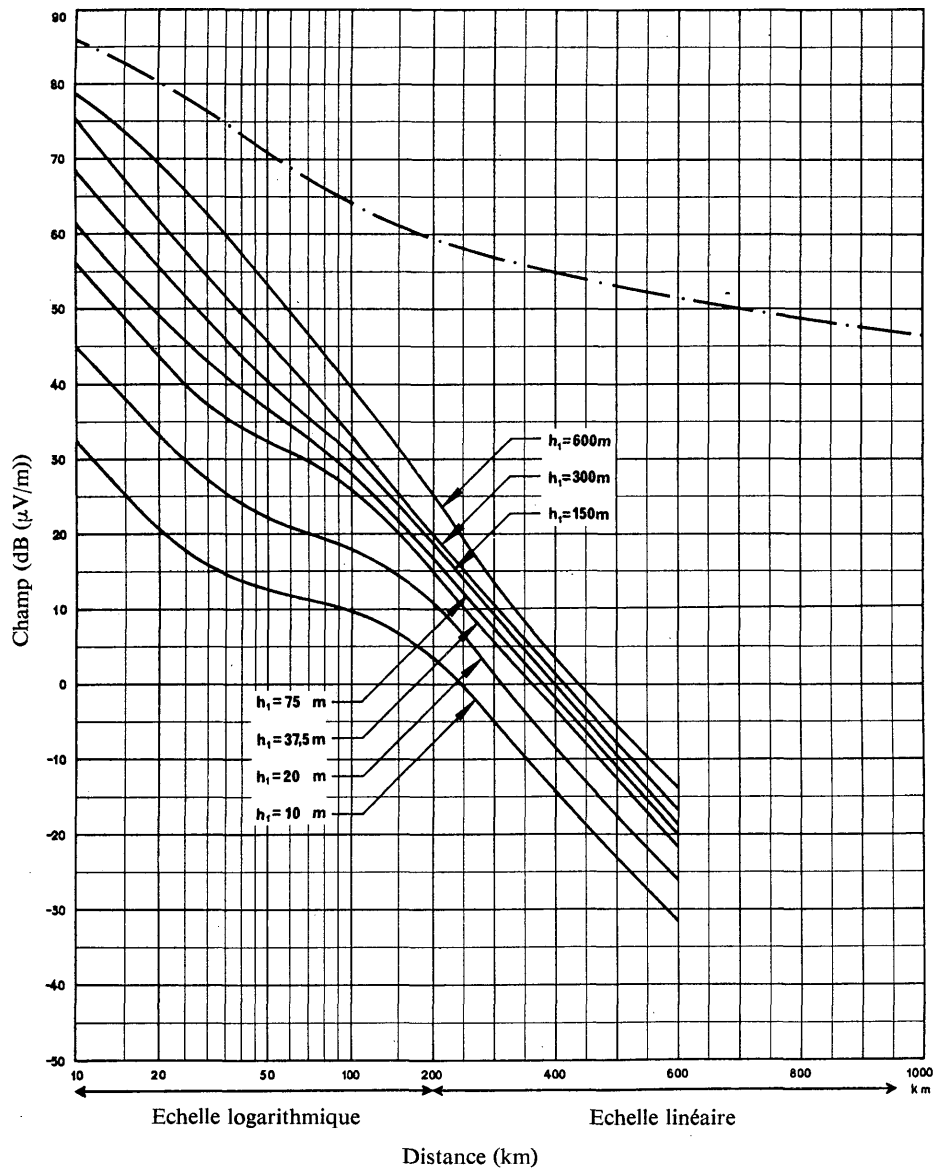


FIGURE 3

Champ (dB ($\mu V/m$)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW

Fréquence ≈ 150 MHz — Terre — zone rurale — 1 % du temps —
50 % des emplacements — $h_2 = 3$ m

· — · — · — · propagation en espace libre

SECTION 5E: QUESTIONS RELATIVES AU SERVICE FIXE DE TERRE

*AVIS ET RAPPORTS**Avis*

Il n'y a pas d'Avis dans cette section.

Rapports

RAPPORT 238-2 *

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES
POUR LES FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON**

(Programme d'études 5B-1/5)

(1959 – 1963 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Il est bien connu que, dans les conditions habituelles de la réfraction, l'affaiblissement de transmission sur les fréquences situées au-dessus de 30 MHz augmente brusquement au-delà de l'horizon, conformément à la diffraction autour d'une terre sphérique, mais une fois qu'il a augmenté de quelques dizaines de décibels au-dessus de la valeur en espace libre, le taux d'affaiblissement en fonction de la distance se trouve ramené à une valeur beaucoup plus faible. On continue donc à avoir des signaux mesurables jusqu'à de grandes distances. A ces distances les évanouissements sont très sévères; cependant, l'ensemble des valeurs mesurées peut être représenté par une courbe exponentielle pour laquelle le taux d'affaiblissement est de l'ordre de 0,1 dB/km. On obtient couramment des distances utiles de 300 km ou plus. A des distances encore plus grandes, ce taux diminue encore, de sorte qu'en utilisant des émetteurs ayant une puissance apparente rayonnée exceptionnellement élevée, on a pu obtenir des liaisons de l'ordre de 1000 km.

Ces signaux, bien que d'amplitude variable, sont persistants et il convient de les distinguer des signaux beaucoup plus intenses qui apparaissent parfois à ces distances et qui sont dus à des conditions spéciales, lorsqu'il se forme, par exemple, des conduits dans la troposphère ou encore lorsqu'on utilise des fréquences plus basses et que l'onde est réfléchi sur les couches ionosphériques anormales. Ces signaux à forte intensité ne peuvent pas servir de base pour établir une liaison permanente, mais ils peuvent créer des brouillages indésirables. Toutefois, les signaux persistants sont attribués à la diffusion des ondes radioélectriques par des non-homogénéités du coïndice imputables à la turbulence atmosphérique. Ce mode de propagation est appelé « diffusion troposphérique ».

On observe des variations lentes et rapides du champ. Les variations lentes sont imputables aux variations générales des conditions de réfraction dans l'atmosphère. Les valeurs médianes horaires au-dessous de la valeur médiane à long terme présentent une répartition approximativement log-normale, avec un écart type compris généralement entre 4 et 8 décibels suivant le climat. Les variations les plus importantes de l'affaiblissement de transmission sont souvent observées sur des trajets où le récepteur est situé juste au-delà de la région de diffraction alors qu'aux très grandes distances les variations sont moins prononcées. Les évanouissements lents ne dépendent pas fortement de la fréquence radioélectrique. Les évanouissements rapides se produisent plusieurs fois par minute aux fréquences basses et plusieurs fois par seconde dans les bandes d'ondes décimétriques. La superposition de plusieurs composantes incohérentes variables donnerait un signal dont l'amplitude obéirait à une loi de répartition de Rayleigh; on constate que cette hypothèse est pratiquement vérifiée si on analyse la répartition pendant des intervalles de temps de durée minimale égale à cinq minutes. Si d'autres type de signaux constituent une fraction importante du signal reçu, cette répartition se trouve modifiée. On a observé des évanouissements rapides, brusques et profonds, au moment où une perturbation frontale affecte une liaison. La réflexion des ondes sur un aéronef peut provoquer des évanouissements rapides très marqués.

* Adopté à l'unanimité; l'attention de la Commission d'études 9 doit être attirée sur le présent Rapport.

Pour les trajets radioélectriques ne s'étendant que légèrement au-delà de l'horizon, ou pour les trajets passant au-dessus d'un obstacle ou au-dessus d'un terrain montagneux, c'est généralement la diffraction qui constitue le mode de propagation déterminant pour l'intensité de champ. En pareils cas, il convient d'appliquer les méthodes décrites dans le Rapport 570.

2. Méthode générale pour le calcul de la valeur médiane annuelle de l'affaiblissement de transmission sur les trajets à diffusion troposphérique

On a la formule approchée ci-après pour le calcul de la valeur médiane annuelle de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion troposphérique:

$$L(50) = 30 \log f - 20 \log d + F(\theta d) - G_p - V(d_e) \quad \text{dB} \quad (1)$$

La Fig. 1 représente les variations de $F(\theta d)$ en fonction du produit θd . La distance angulaire θ est l'angle formé par les rayons à l'horizon radioélectrique, dans le plan du grand cercle qui contient les antennes, pour des conditions atmosphériques médianes et d est la distance entre celles-ci [NBS, 1967].

On obtient une estimation semi-empirique de G_p par la formule:

$$G_p = G_t + G_r - 0,07 \exp [0,055 (G_t + G_r)] \quad \text{dB} \quad (2)$$

pour des valeurs de G_t et G_r inférieures chacune à 50 dB. (Voir aussi le § 9).

$V(d_e)$ est un facteur de correction qui tient compte des divers types de climat (voir le § 3). On définit comme suit une « distance équivalente » d_e en fonction de la longueur du trajet de propagation d , des hauteurs équivalentes d'antenne h_{te} et h_{re} au-dessus du terrain et de la fréquence f en MHz.

On définit θ_{sl} comme la distance angulaire sur laquelle les affaiblissements de transmission dus à la diffraction et à la diffusion vers l'avant sont sensiblement égaux au-dessus d'une terre régulière d'un rayon fictif $a = 9000$ kilomètres et l'on définit d_{sl} comme égal à $9000 \theta_{sl}$. Ainsi:

$$d_{sl} = 65 (100/f)^{1/3} \quad \text{km} \quad (3)$$

On compare la longueur du trajet d avec la somme de d_{sl} et des distances aux horizons radio-électriques sur une terre régulière:

$$d_L = 3 \sqrt{2h_{te}} + 3 \sqrt{2h_{re}} \quad \text{km} \quad (4)$$

où les hauteurs équivalentes d'antenne h_{te} et h_{re} sont ici exprimées en mètres.

On a observé que la variation à long terme de la médiane horaire (voir aussi § 4) (c'est-à-dire de l'affaiblissement de transmission) est, en moyenne, plus grande pour des valeurs de d qui ne sont que légèrement supérieures à la somme de d_{sl} et d_L . La distance équivalente d_e est arbitrairement définie comme suit:

$$\text{pour } d \leq d_L + d_{sl}, \quad d_e = 130d/(d_L + d_{sl}) \quad \text{km} \quad (5a)$$

$$\text{pour } d > d_L + d_{sl}, \quad d_e = 130 + d - (d_L + d_{sl}) \quad \text{km} \quad (5b)$$

3. Influence du climat

On définit les types de climat ci-après, dont il faut tenir compte pour la correction des données de propagation indiquées aux § 2, 4 et 5. Ces corrections sont confirmées par des résultats de mesure.

Type 1: Climat équatorial (données du Congo et de la Côte d'Ivoire).

Type 2: Climat intertropical continental (Soudan).

Type 3: Climat intertropical maritime (données de la Côte occidentale d'Afrique).

Type 4: Climat désertique (Sahara).

Type 5: Climat méditerranéen (pas de courbes disponibles).

Type 6: Climat continental tempéré (données fournies par la France, la République Fédérale d'Allemagne et les Etats-Unis d'Amérique).

Type 7a: Climat maritime tempéré, zones terrestres (données du Royaume-Uni).

Type 7b: Climat maritime tempéré, zones maritimes (données du Royaume-Uni).

Type 8: Climat polaire (pas de courbes disponibles).

Cette division est évidemment assez grossière et les conditions géographiques locales pourraient nécessiter d'importantes modifications. On trouvera dans le Rapport 233-3 une brève description des climats énumérés ci-dessus.

Les valeurs de $V(d_e)$ (voir le § 2) sont données dans la Fig. 2, en fonction de la distance et du climat.

Dans les climats tempérés, les valeurs médianes mensuelles des affaiblissements ont tendance à être plus élevées en hiver qu'en été, mais la différence diminue quand la distance augmente. Des mesures effectuées à 800 MHz dans la partie européenne de l'U.R.S.S. pour un trajet de 920 km montrent que la différence entre les valeurs médianes obtenues en été et en hiver n'est que de 2 dB [C.C.I.R., 1966-1969a]. Pour des trajets de longueur moyenne, la différence est d'environ 15 dB. Il y a également des variations diurnes, l'affaiblissement de transmission étant généralement maximal dans l'après-midi [C.C.I.R., 1966-1969b]. Les trajets maritimes ont plus de chances que les trajets terrestres d'être affectés par la superréfraction et les couches élevées; on a donc des variations plus importantes sur les trajets maritimes [C.C.I.R., 1970-1974a]. Il en est parfois de même dans les régions côtières à terrain plat et bas, dans les zones maritimes.

Dans les climats désertiques secs et chauds, l'affaiblissement est maximal en été. Les variations annuelles des médianes mensuelles pour des trajets de longueur moyenne dépassent 20 décibels. Les variations diurnes sont très importantes.

Dans les climats équatoriaux, les variations annuelles ou diurnes sont en général faibles.

Dans les climats de mousson, où des mesures ont été faites (Sénégal, Barbades), l'affaiblissement est minimal pendant les périodes de transition entre les saisons sèches et les saisons humides.

4. Variations à long terme de la valeur médiane horaire de l'affaiblissement de transmission dans différents climats

La qualité du fonctionnement d'un service de radiocommunication dépend du rapport signal/bruit. En règle générale, si l'on veut obtenir un service satisfaisant sur un trajet de propagation donné, il faut assurer une protection contre les bruits lorsque les conditions de propagation sont médiocres *. La valeur minimale admissible du rapport dépend, d'une part, des caractéristiques des évanouissements subis par le signal et par les bruits, d'autre part, des systèmes de démodulation et de codage utilisés. Si les caractéristiques des évanouissements restent invariables, le rapport en question est constant dans le temps. Par ailleurs, les rapports disponibles dépendent de l'intensité des signaux utiles et des bruits et varient dans le temps. En conséquence, on fait une distinction entre les évanouissements rapides (voir les § 1 et 10) et les variations journalières et saisonnières lentes ou « évanouissements de puissance à long terme », qui sont liées à des variations des conditions moyennes de réfraction de turbulence ou de stratification de l'atmosphère.

Il est commode de décomposer la puissance d'enveloppe instantanée (dBW) en deux composantes additives, l'une correspondant aux évanouissements rapides, l'autre aux évanouissements de puissance à long terme. Dans ce paragraphe, on ne considérera que les valeurs médianes horaires des affaiblissements de transmission à long terme ainsi que les variations temporelles de ces valeurs au cours d'une année.

On peut faire une estimation de $P(q)$, valeur de la puissance P dépassée pendant $q\%$ du temps, ou de $L(q)$, valeur de L dépassée pendant un pourcentage de temps de $(100 - q)$. La quantité $P(q)$ et l'affaiblissement de transmission correspondant $L(q)$ sont exprimés en fonction des valeurs médianes à long terme $P(50)$ et $L(50)$:

* En revanche, il faut assurer une protection contre les signaux brouilleurs transmis dans la même voie ou dans une voie adjacente, lorsque les conditions de propagation sont favorables (voir Rapport 569).

Ainsi:

$$P(q) = P(50) + Y(q) \quad \text{dBW} \quad (6a)$$

ou bien:

$$L(q) = L(50) - Y(q) \quad \text{dB} \quad (6b)$$

$$Y(q) = Y_0(q) g(f) \quad (7)$$

La Fig. 3 illustre des estimations empiriques du facteur $g(f)$ et les Fig. 4 à 10 des estimations empiriques de $Y_0(q)$ pour les divers climats.

La formule ci-après donne une estimation de l'erreur type commise dans la prévision, pour un pourcentage de temps quelconque:

$$\sigma(q) = \sqrt{13 + 0,12 Y^2(q)} \quad \text{dB} \quad (8)$$

5. Affaiblissement de transmission non dépassé pendant 99 % du mois le plus défavorable

Dans une autre méthode, décrite en [Boithias et Battesti, 1965], on détermine l'affaiblissement qui n'est pas dépassé pendant un grand pourcentage de temps, par exemple, 99 %, du mois le plus défavorable. On a généralement besoin de ce genre de renseignement pour étudier les liaisons de point à point.

Après avoir déterminé la distance équivalente (ici définie comme le produit de la distance angulaire, θ , par le rayon équivalent de la Terre) par une étude du profil de la liaison tracé pour une terre de rayon 8500 km, on se reporte aux courbes de la Fig. 11 établies pour une fréquence de 1 GHz pour les différents climats définis en annexe. On obtient ainsi pour le climat considéré l'affaiblissement entre antennes isotropes. Les climats considérés ici sont les mêmes que ceux mentionnés au § 3 et dans le Rapport 233-3.

Pour une fréquence quelconque comprise entre environ 200 et 4000 MHz, on ajoute à l'affaiblissement précédent la correction lue sur la Fig. 12. On obtient ainsi pour la fréquence et le climat choisis les affaiblissements non dépassés pendant 99 % du mois le plus mauvais.

S'il est nécessaire de connaître l'affaiblissement pour un autre pourcentage du mois le plus mauvais, on détermine l'écart type par la Fig. 13 et on admet une loi log-normale pour représenter la répartition mensuelle des variations lentes.

D'autres méthodes sont décrites dans [Wvedensky, 1965] et [C.C.I.R., 1963-1966a].

6. Calcul de l'affaiblissement de transmission lorsqu'on connaît les paramètres radiométéorologiques

Des études effectuées par l'Administration française ont montré que l'affaiblissement entre antennes isotropes pouvait être représenté par une formule qui semble être valable dans tous les climats:

$$L_b = 110,5 + 30 \log d + 30 \log f - T \quad (9)$$

L_b : affaiblissement entre antennes isotropes (affaiblissement de transmission de référence) en décibels

d : distance en kilomètres

f : fréquence en MHz

T : paramètre déterminé à l'aide de sondages météorologiques (voir le Rapport 233-3).

Le pourcentage de temps auquel correspond la valeur de L_b dépend des heures des sondages météorologiques utilisés, comme il est exprimé à la référence [Battesti et autres, 1968].

L'Administration des Etats-Unis d'Amérique a comparé la formule (9) avec toutes les données qui ont servi de base à l'élaboration de la méthode décrite au § 2, et a trouvé une bonne concordance entre les valeurs calculées et mesurées. Toutefois, cette Administration estime qu'il est possible d'améliorer encore la méthode de calcul par les modifications suivantes:

— Remplacer les termes $30 \log d + 30 \log f$ de la formule (9) par l'expression :

$$20 \log (fd) + 10 \log (fD_s)$$

où D_s est la distance en kilomètres entre les horizons radioélectriques dans les conditions atmosphériques médianes.

— Remplacer la constante 110,5 dB par l'expression

$$K_1(D_s) - K_2(D_s\theta)$$

où θ est la distance angulaire, en radians, dans les conditions atmosphériques médianes. Les fonctions $K_1(D_s)$ et $K_2(D_s\theta)$ sont représentées aux Fig. 14a et 14b.

Lorsque $D_s\theta < 1$ km ou $D_s < 50$ km, on peut s'attendre à ce que le mécanisme de propagation prédominant soit la diffraction et non pas la diffusion vers l'avant.

7. Influence de la fréquence

Il est généralement admis que la valeur médiane de l'affaiblissement de transmission à long terme par rapport à l'espace libre augmente comme la fréquence f (voir aussi le § 2), jusqu'à environ 3 GHz.

Pour des mesures dont la période d'échantillonnage est inférieure à 1 heure, la loi selon laquelle l'affaiblissement de transmission dépend de la fréquence varie entre f^2 et $f^{-1/3}$ [Ecklund et Wickerts, 1968].

Des mesures effectuées en France [Win Tin et Battesti] à 460 et 2220 MHz et sur deux distances 325 et 165 km montrent que l'augmentation de l'affaiblissement par rapport à l'espace libre, en fonction de la fréquence :

- est plus importante sur la liaison longue où la loi est f^2 pour 1 % du temps et f pour 99 % du temps, que sur la liaison courte, où la loi est $f^{1,5}$ pour 1 % du temps et $f^{0,5}$ pour 99 % du temps;
- est un peu plus importante l'été que l'hiver; cette différence est plus marquée sur la liaison courte;
- décroît en moyenne lorsque le niveau reçu décroît.

Des mesures faites en Inde [Majumdar et Sarkar] sur 120 MHz et 2 GHz ont montré que l'affaiblissement de transmission par rapport à l'affaiblissement en espace libre croît la plupart du temps proportionnellement à la fréquence (gradients du coïndice compris entre -40 et -157 unités N/km). Pour de petits pourcentages de temps, l'exposant de la fréquence tombe au-dessous de l'unité et prend même parfois des valeurs négatives.

Au-dessus de 10 GHz, l'absorption par l'oxygène atmosphérique et la vapeur d'eau sur les trajets transhorizon n'est pas négligeable. Le Rapport 233-3 indique comment on peut déterminer les affaiblissements dans une atmosphère ayant une humidité absolue moyenne. Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne [Abel, 1972] à la fréquence de 12 GHz, sur un trajet de 210 km, ont montré que, pendant les petits pourcentages de temps, les précipitations ont pour effet, soit d'accroître l'affaiblissement de transmission par absorption, soit de le faire décroître par diffusion, selon la position des cellules de précipitation sur le trajet.

8. Réception en diversité

Les évanouissements profonds qui accompagnent la propagation par diffusion diminuent sérieusement les performances des systèmes qui reposent sur ce mode de propagation. On peut atténuer les effets des évanouissements en recourant à la réception par diversité, qui consiste à faire usage de deux, ou plus de deux signaux, dont les évanouissements sont plus ou moins indépendants en raison de leurs différences de trajets, de fréquences ou d'instantanés d'émission. L'effet de la diversité d'espace a été étudié en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1966-1969c] par la mesure de la fonction de corrélation dans l'espace et de sa longueur d'échelle l , en utilisant des enregistrements simultanés de l'affaiblissement de transmission sur plusieurs antennes (généralement au nombre de trois) espacées horizontalement et verticalement.

Dans un système fonctionnant en diversité d'espace, l'espacement qu'il convient de donner aux antennes de réception dépend de la longueur d'échelle, l , (m) définie par la fonction de corrélation, et du diamètre, D , (m) des antennes. Vu la nature statistique de l , il convient d'utiliser la valeur de cette grandeur qui est dépassée pendant 1 % du temps, que l'on représente par l_y dans le sens horizontal et par l_z dans le sens vertical. Les espacements suffisants Δ_y , (m) et, Δ_z , (m) sont alors donnés pour des fréquences supérieures à 1000 MHz par les relations

$$\Delta_y = 0,36 (D^2 + 4l_y^2)^{1/2} \quad (10)$$

$$\Delta_z = 0,36 (D^2 + l_z^2)^{1/2}$$

Des mesures ont conduit aux valeurs suivantes:

$$l_y \simeq 20 \text{ m}, l_z \simeq 15 \text{ m}.$$

On peut encore employer la diversité de fréquence. On a trouvé [C.C.I.R., 1966–1969c] qu'une valeur convenable pour la différence de fréquence, Δf , (MHz) est:

$$\Delta f = (1,44f/\delta d) (D^2 + l_z^2)^{1/2}, \quad (11)$$

expression dans laquelle f en MHz est la fréquence porteuse, δ en milliradians, l'angle de diffusion au centre du volume commun et d en km, la distance entre émetteur et récepteur. Ces formules doivent être utilisées avec précaution lorsqu'il s'agit de fréquences nettement inférieures à 1000 MHz. La variation du coefficient de corrélation de fréquence avec la longueur du trajet a été étudiée en France [C.C.I.R., 1963–1966b].

Il est encore possible de recourir à la diversité angulaire, en employant des alimentations multiples et un réflecteur commun. Un système simple de ce genre, utilisé à l'extrémité réceptrice, peut assurer des caractéristiques de fonctionnement comparables à celles de la réception en diversité tout en étant beaucoup plus économique, notamment lorsqu'on approche des bandes d'ondes centimétriques [Surenian, 1965]. Une autre mesure relative à la diversité angulaire, effectuée au Japon [Iwasa et Kurobe] sur un trajet maritime de 256 km à 1,8 GHz, a montré qu'une séparation supérieure à environ 6 mrad entre les faisceaux donne un coefficient de corrélation suffisamment faible, inférieur à 0,4. On en conclut que les résultats obtenus avec la diversité angulaire peuvent être considérés comme comparables à ceux de la diversité de fréquence, bien qu'il y ait une légère augmentation de l'affaiblissement de transmission.

Il est peu probable que l'emploi de la diversité de polarisation puisse être de quelque utilité pratique, car on constate que la polarisation se conserve bien, tandis que l'affaiblissement de transmission ne semble pas dépendre du fait que l'on a employé la polarisation verticale ou horizontale.

9. Gain de l'antenne pour le trajet

il manque une phrase (v. texte anglais)

Le gain global des antennes d'émission et de réception peut être inférieur à la somme des gains de ces antennes pour les ondes planes. Cette diminution apparente du gain est appelée « baisse de gain » ou « perte par couplage entre l'antenne et le milieu ». L'analyse théorique [NBS, 1967] montre que la perte dépend du gain d'antenne et de la longueur du trajet.

On a observé expérimentalement que le gain de l'antenne pour le trajet ou le gain effectif total d'antenne sur une liaison transhorizon sont pratiquement indépendants de la distance, entre 150 et 500 km environ [Boithias et Battesti, 1964]. D'autre part, on peut considérer que le gain effectif total (Fig. 15) dépend exclusivement de la somme des gains d'antenne en espace libre, sans corrections importantes, à condition qu'aucun des gains en espace libre ne dépasse 55 dB environ, et que les gains des deux antennes ne soient pas trop différents.

Si l'on utilise des antennes à gain très élevé, le gain effectif total de l'antenne (gain de l'antenne pour le trajet) n'augmente que du quart de l'augmentation obtenue en additionnant les deux gains en espace libre. Pour les distances supérieures à 500 km, la dégradation du gain de l'antenne semble diminuer et devient très faible à 1000 km environ [C.C.I.R., 1966–1969d].

Des mesures faites au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1970–1974b] sur deux trajets de 300 km, à la fréquence de 2 GHz, ont révélé une dégradation du gain pour une antenne ayant un gain de 53 dB; pour les cas les plus importants d'une faible puissance à la réception (99 % des niveaux), on a constaté que la Fig. 15 donnait des résultats trop favorables de plusieurs dB. On peut s'attendre à ce que cette variation soit moins importante avec des antennes ayant des gains plus petits.

Pour calculer les champs de brouillages on ne doit pas tenir compte de la dégradation du gain de l'antenne car les champs plus élevés que la valeur médiane sont en général cohérents et ne subissent pas cette perte.

10. Fréquence des évanouissements

La rapidité des évanouissements est un facteur important, surtout lorsqu'il s'agit de transmettre des signaux numériques. Ce facteur a été étudié, en République Fédérale d'Allemagne [Fehlhaber et Grosskopf, 1966 et 1967; Grosskopf et Fehlhaber, 1962], du point de vue de la fonction d'auto-corrélation dans le temps, ce qui conduit à une « fréquence moyenne d'évanouissements ». Cette grandeur fournit une mesure de la vitesse d'évanouissements. Elle varie de manière statistique entre 0,0444 fois sa valeur médiane (pour 99 % du temps) et 4,3 fois sa valeur médiane (pour 1 % du temps). La valeur médiane f_{sm} elle-même augmente de façon presque proportionnelle à la distance et à la fréquence porteuse; elle atteint sensiblement 4 Hz pour une fréquence porteuse de 10 GHz. En outre [C.C.I.R., 1966–1969c], elle diminue légèrement lorsque les diamètres des antennes augmentent. A 12 GHz, pendant que s'exerce l'influence de la pluie, on a observé des fréquences d'évanouissement allant jusqu'à environ 20 Hz [Abel, 1972].

Des mesures effectuées au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1970–1974c] à la fréquence 2 GHz, sur deux trajets de 300 km, ont montré comment varie la répartition du taux d'évanouissement en fonction des variations du niveau médian. Lorsque les niveaux médians de l'affaiblissement le long du trajet étaient inférieurs de plus de 45 dB au niveau en espace libre, on n'observait pas plus de trois évanouissements par minute; en revanche, si les niveaux médians de l'affaiblissement étaient inférieurs de plus de 75 dB au niveau en espace libre, le taux d'évanouissement médian était d'environ 30 évanouissements par minute et la gamme des taux d'évanouissement était comprise entre 6 et 120 évanouissements par minute.

11. Largeur de bande transmissible

Les diverses hétérogénéités qui produisent la propagation par diffusion créent autant de trajets de propagation différents, variables en nombre et en temps de transmission. Il en résulte que les coefficients de transmission pour deux fréquences voisines ne sont pas entièrement corrélés ce qui provoque une distorsion du signal transmis. La largeur de bande transmissible est la bande de fréquences à l'intérieur de laquelle la distorsion due à ce phénomène est acceptable pour le signal transmis. Cette largeur de bande dépend donc à la fois de la nature du signal transmis (multiplex téléphonique, image de télévision, etc.) et de la distorsion admissible pour ce signal. Des études effectuées en France [Battesti et Boithias, 1971] montrent que:

- l'augmentation du gain des antennes élargit la bande transmissible dans la mesure où il y a aussi accroissement de la baisse de gain, (c'est-à-dire pour des gains supérieurs à environ 30 dB);
- toutes autres choses égales par ailleurs, la largeur de bande transmissible dépend de la structure de l'atmosphère et donc de la région climatique considérée;
- la largeur de bande transmissible diminue lorsque la distance augmente, mais suivant une loi qui n'est pas la même dans tous les climats;
- la largeur de bande transmissible est diminuée lorsqu'il existe des angles au départ positifs, et elle est augmentée s'il existe des angles au départ négatifs.

12. Influence de l'emplacement des stations

Le choix de l'emplacement des points extrêmes des liaisons utilisant la transmission transhorizon demande un certain soin. Les faisceaux d'antenne ne doivent pas être masqués par des obstacles proches et la condition fondamentale à observer est que les antennes soient pointées sur l'horizon. Une inclinaison des faisceaux d'antennes de $0,5^\circ$ vers le haut suffit à provoquer un affaiblissement de l'ordre de 10 dB, dû probablement à l'augmentation de l'angle à l'intérieur duquel le rayonnement doit être diffusé. On a effectué au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1970–1974d] des mesures dans lesquelles on utilisait une antenne ayant un gain de 53 dB, dont on écartait le faisceau de la direction de l'horizon (grand cercle) de deux émetteurs de 2 GHz, chacun d'eux distants de 300 km; ces mesures ont fait apparaître un taux de décroissance de la puissance reçue de 9 dB par degré. Ce résultat a été obtenu avec une augmentation de l'angle de diffusion dans les trois premiers degrés, aussi bien en azimut qu'en site, pour chaque trajet, et pour une gamme étendue de pourcentages de temps.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABEL, N. [janvier 1972] Beobachtungen an einer 210 km langen 12-GHz-Strecke (Observations sur une liaison de 210 km à 12 GHz). Techn. Ber. FTZ N° A. 455 TBr 34.
- BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [janvier-février 1971] Nouveaux éléments sur la propagation par les hétérogénéités de l'atmosphère. *Ann. des télécom.*
- BATTESTI, J., BOITHIAS, L. et MISMÉ, P. [mai-juin 1968] Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques. *Ann. des télécom.*
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1964] Etude expérimentale de la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Ann. des télécom.*
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [juillet-août 1965] Les faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité. *Ann. des télécom.*
- C.C.I.R. [1963-1966a] Doc. V/87, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1963-1966b] Doc. V/114, France.
- C.C.I.R. [1966-1969a] Doc. V/140, U.R.S.S.
- C.C.I.R. [1966-1969b] Doc. V/142, O.I.R.T.
- C.C.I.R. [1966-1969c] Doc. V/26, République Fédérale d'Allemagne.
- C.C.I.R. [1966-1969d] Doc. V/133, France.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/80, U.R.S.S.
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/156, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974c] Doc. 5/158, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974d] Doc. 5/155, Royaume-Uni.
- EKLUND, F. et WICKERTS, S. [novembre 1968] Wavelength dependence of microwave propagation far beyond the radio horizon. *Radio Science* 3, 11.
- FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1^{er} mars 1966] Die mittlere Schwundfrequenz auf Scatterstrecken im Frequenzbereich 1 GHz bis 10 GHz (La fréquence moyenne d'évanouissement sur les faisceaux hertziens transhorizon fonctionnant dans la bande 1 à 10 GHz). Techn. Ber. FTZ, N° 5582.
- FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1967] Das Elektromagnetische Feld am Empfangsort einer troposphärischen Scatterstrecke, I und II (Le champ électromagnétique à la station de réception d'un faisceau hertzien transhorizon I et II). *NTZ*, 20, 511-520 et 649-657.
- GROSSKOPF, J. et FEHLHABER, L. [1962] Häufigkeit und Dauer einzelner Schwundeinbrüche bei troposphärischen Scatterstrecken (Fréquence et durée des évanouissements profonds sur les liaisons par diffusion troposphérique). *NTZ*, 2, 71.
- IWASA, H. et KUROBE, A. Experimental results of angle diversity effect in transhorizon radio-relay system. *Trans. I.E.C.E. Japan*, 57-B, 9.
- MAJUMDAR, S.C. et SARKAR, S.K., Transhorizon propagation characteristics at 2 GHz and 120 MHz in Northern India. Based on CENTROP-9. Report No. 9, Centre of Research on Troposphere, Radio Science Division, National Physical Laboratory, New Delhi-110012 (Inde).
- NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, Revised, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
- SURENIAN, D. [juin 1965] Experimental results of angle diversity system tests. *IEEE Trans. Com. Tech.*, COM-13, 2, 208.
- WIN TIN, J. et BATTESTI, J. Etude expérimentale de l'influence de la fréquence sur la propagation par diffusion troposphérique — (à paraître dans) *Ann. des télécom.*
- WVEDENSKY, B., Ed. [1965] *Propagation transhorizon en ondes métriques*. Sovietskoye Radio.

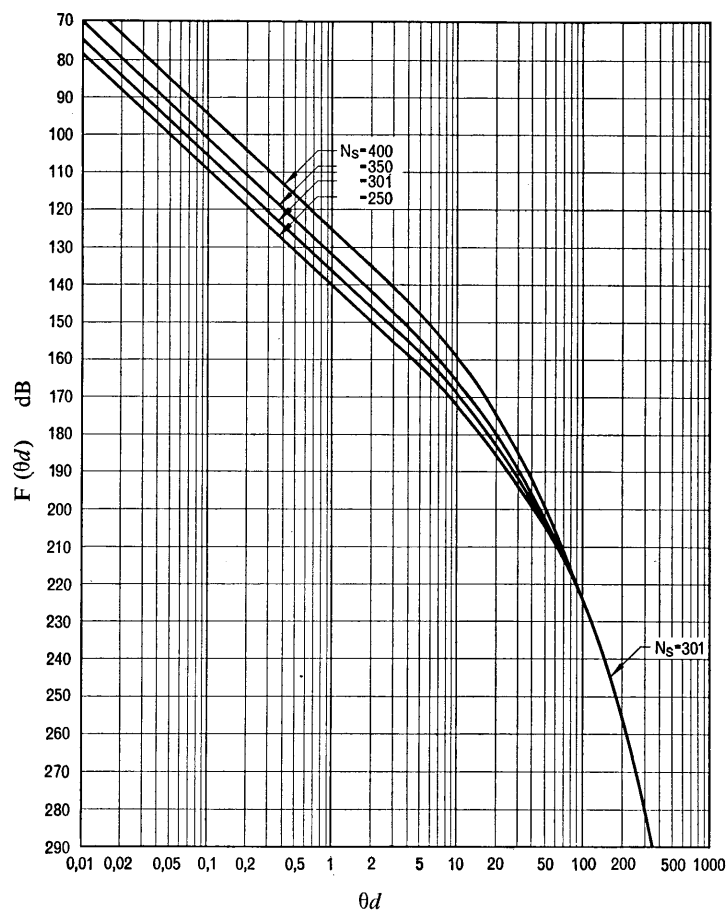


FIGURE 1

Fonction d'affaiblissement, $F(\theta d)$; d en km et θ en radian

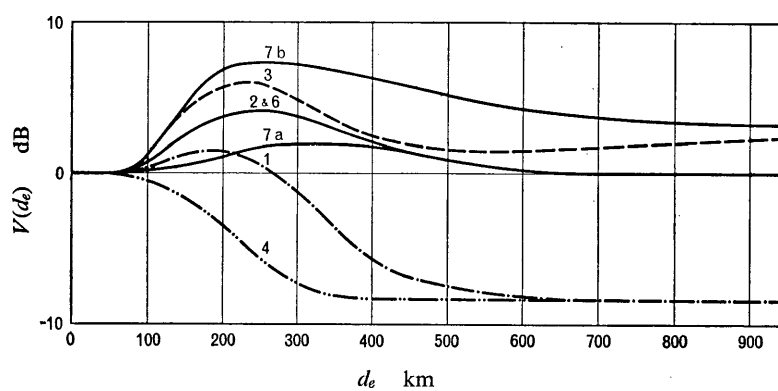


FIGURE 2

Fonction $V(d_e)$ pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir § 3)

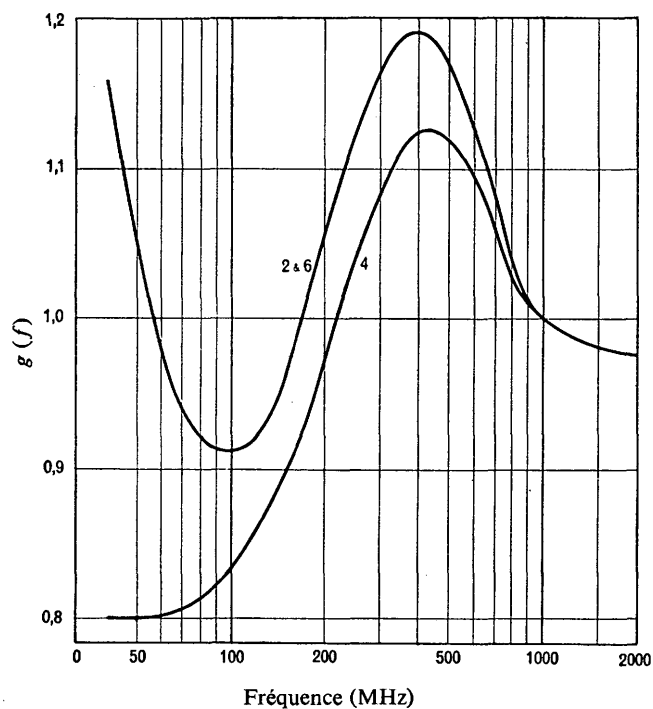


FIGURE 3

Fonction $g(f)$ pour les types de climat désignés par les chiffres sur les courbes (voir § 3)

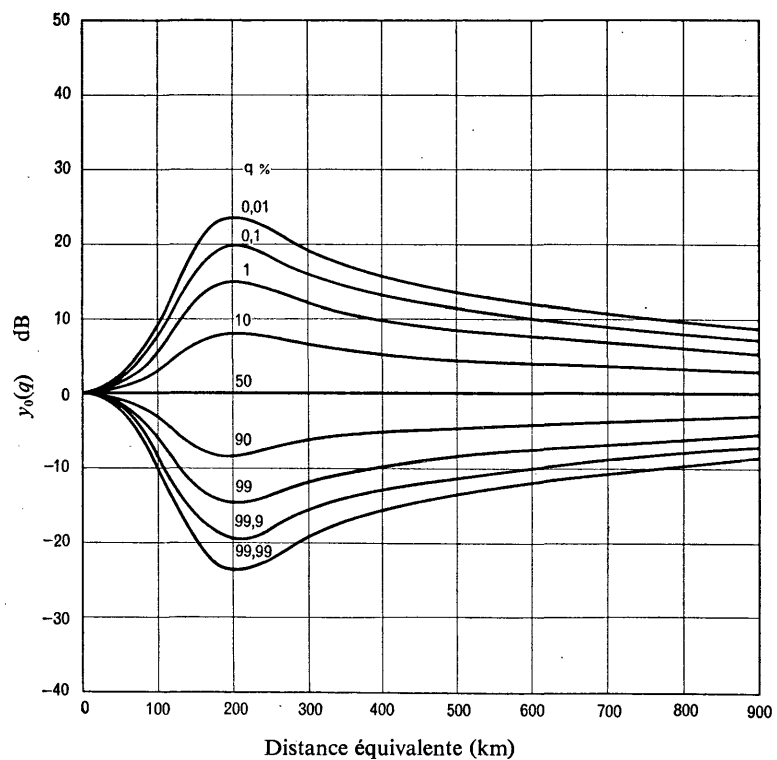


FIGURE 4

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 1 (équatorial)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

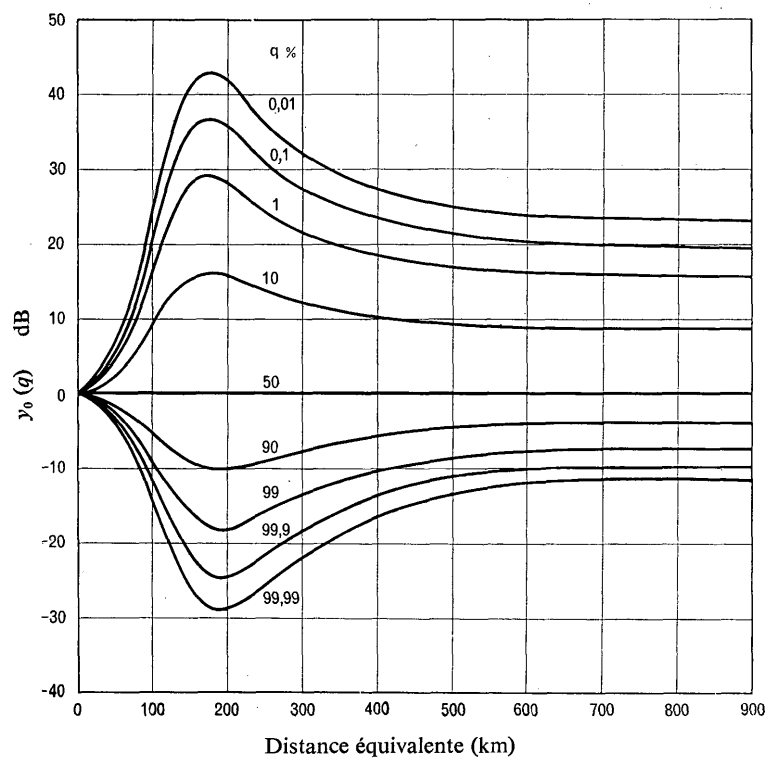


FIGURE 5

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 2 (intertropical continental, Soudan)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

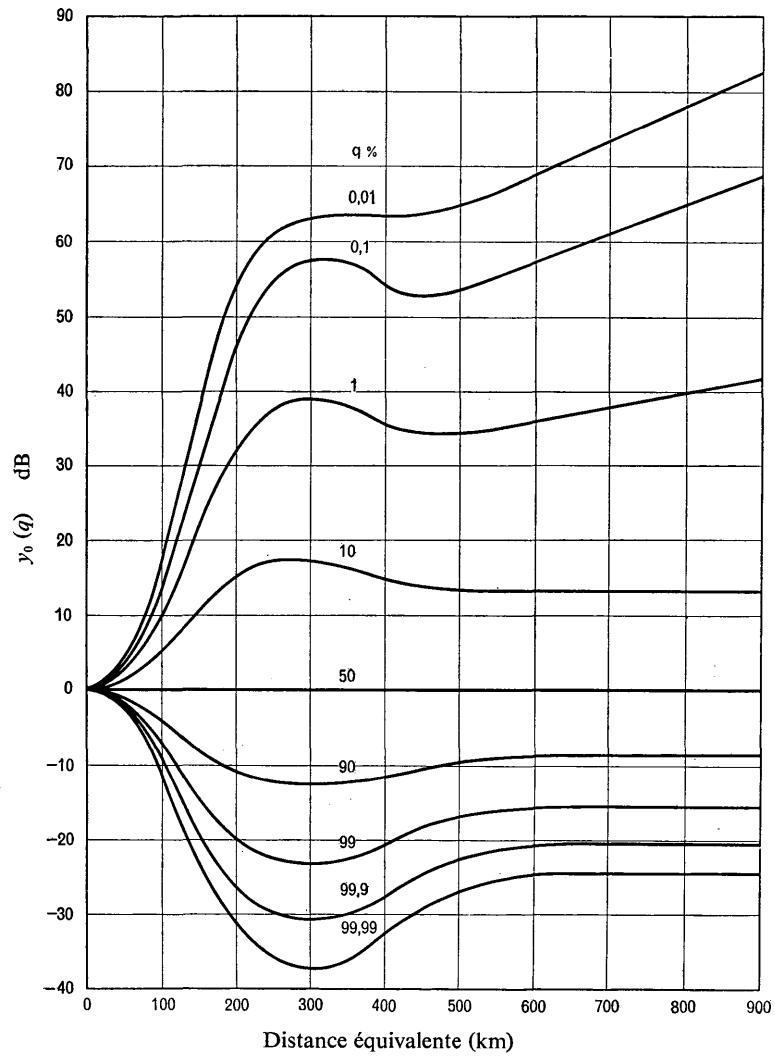


FIGURE 6

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 3 (intertropical maritime)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

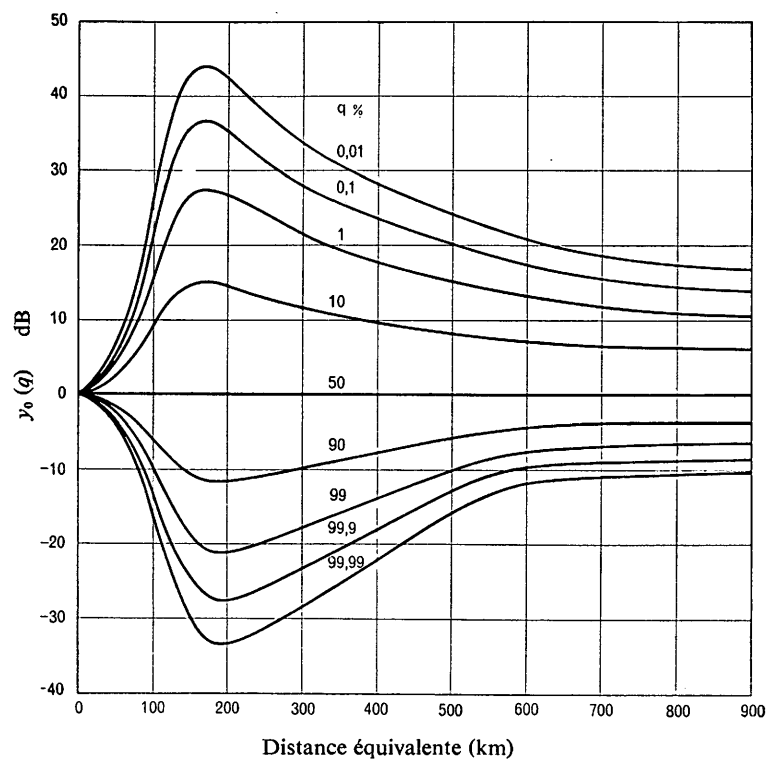


FIGURE 7

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 4 (désertique, Sahara)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

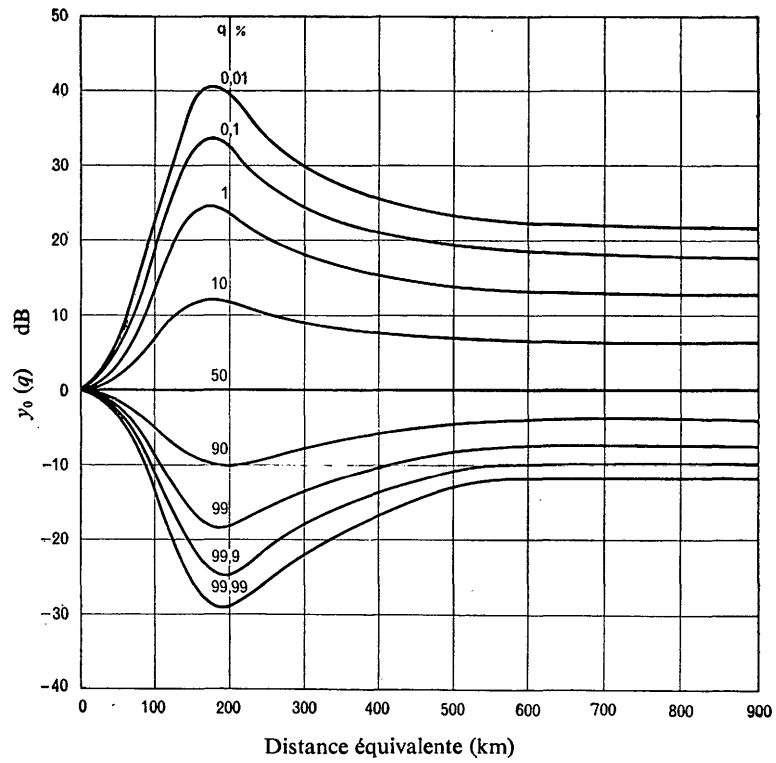


FIGURE 8

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 6 (continental tempéré)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

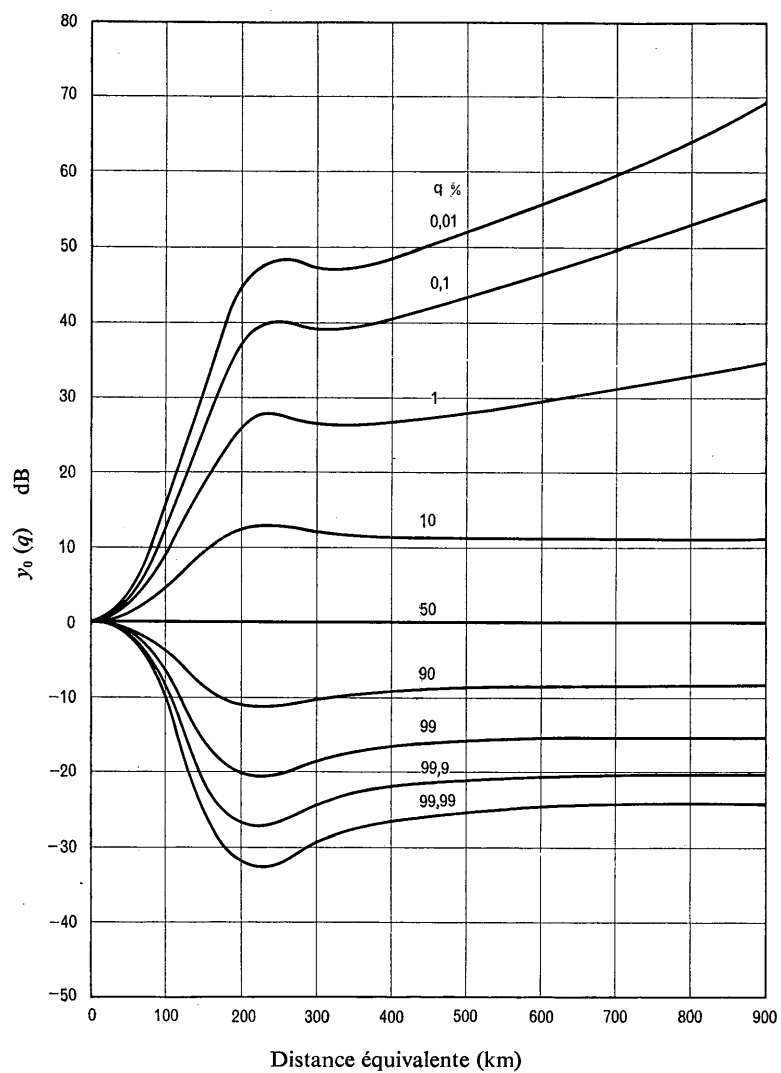


FIGURE 9

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 7a (maritime tempéré). Trajets terrestres
 (Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

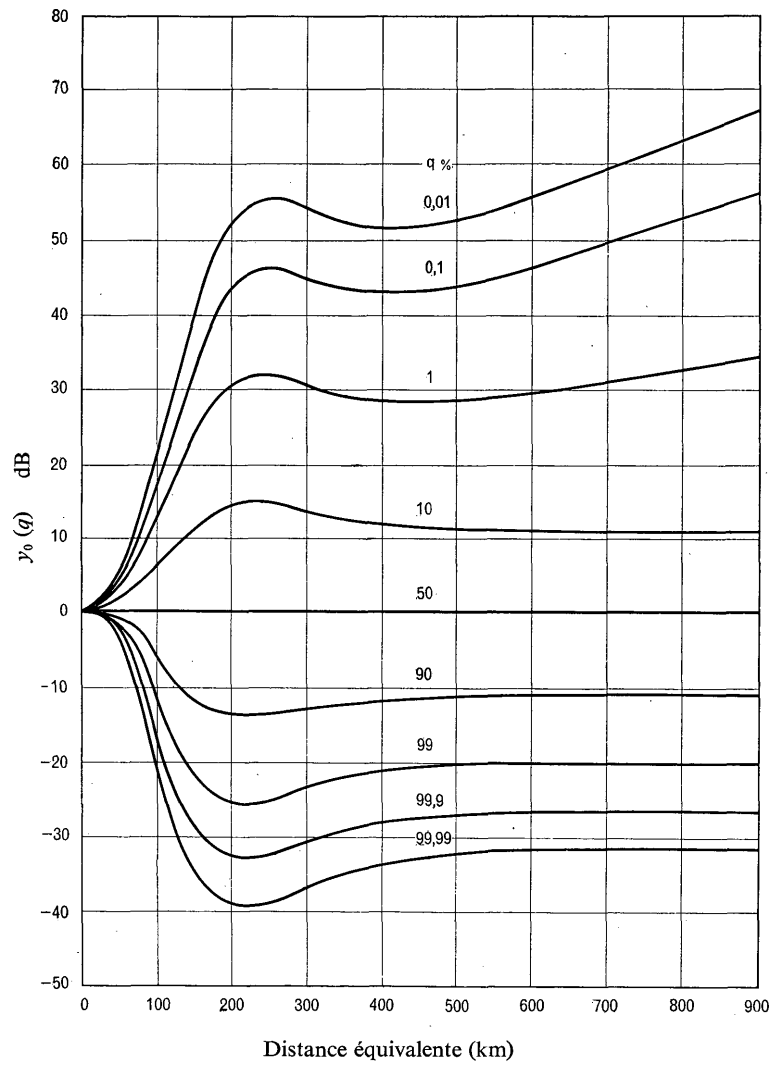


FIGURE 10

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 7b (maritime tempéré). Trajets maritimes
(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

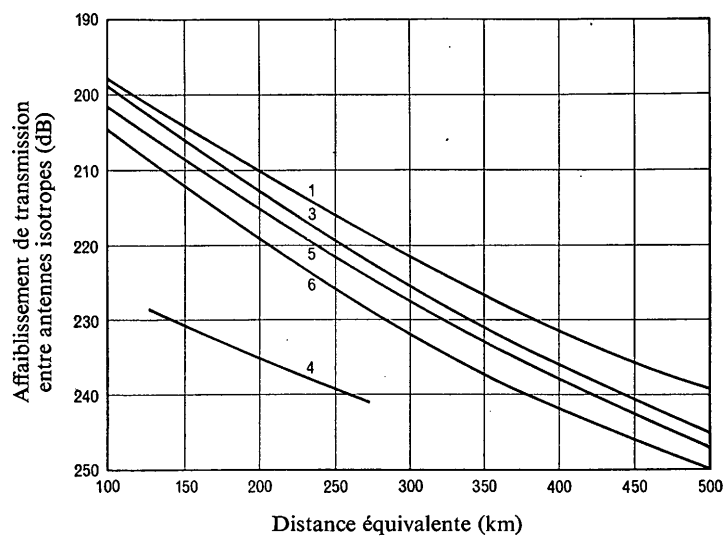


FIGURE 11

Valeur de l'affaiblissement de transmission qui n'est pas dépassée pendant 99 % du mois le plus défavorable pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 3)

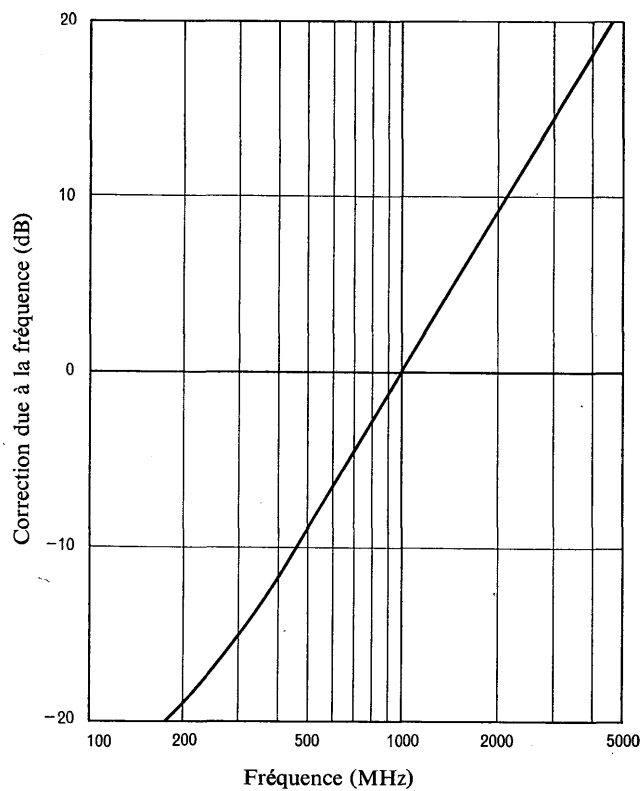


FIGURE 12

Corrections à appliquer aux valeurs obtenues à partir des courbes de la Fig. 11 pour des fréquences autres que 1 GHz

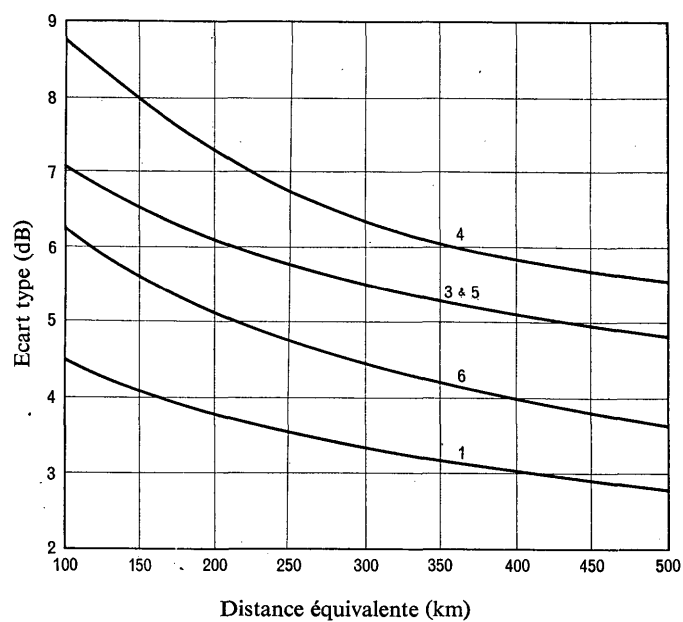


FIGURE 13

Ecart type pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 3)

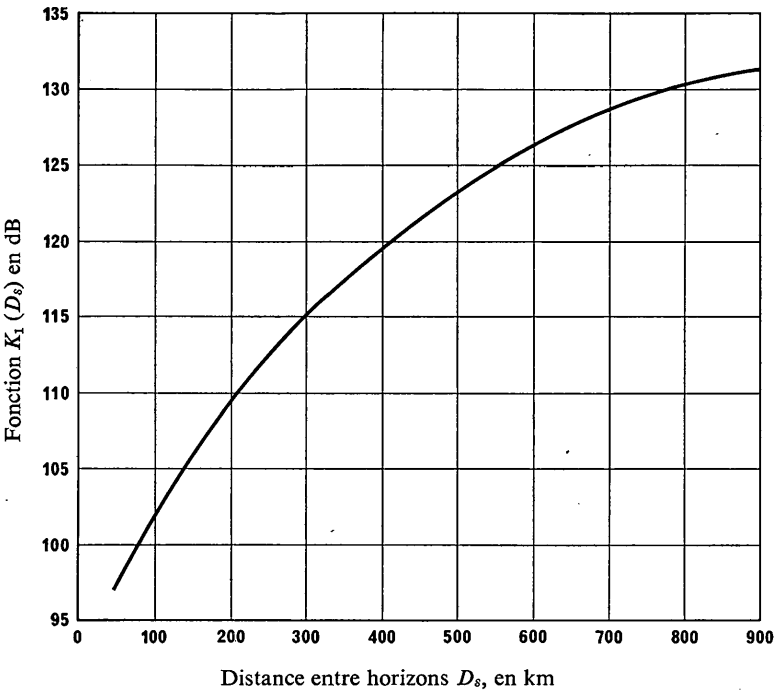


FIGURE 14a

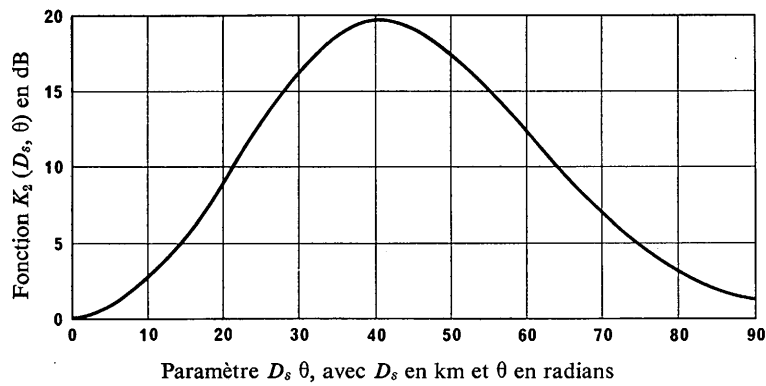


FIGURE 14b

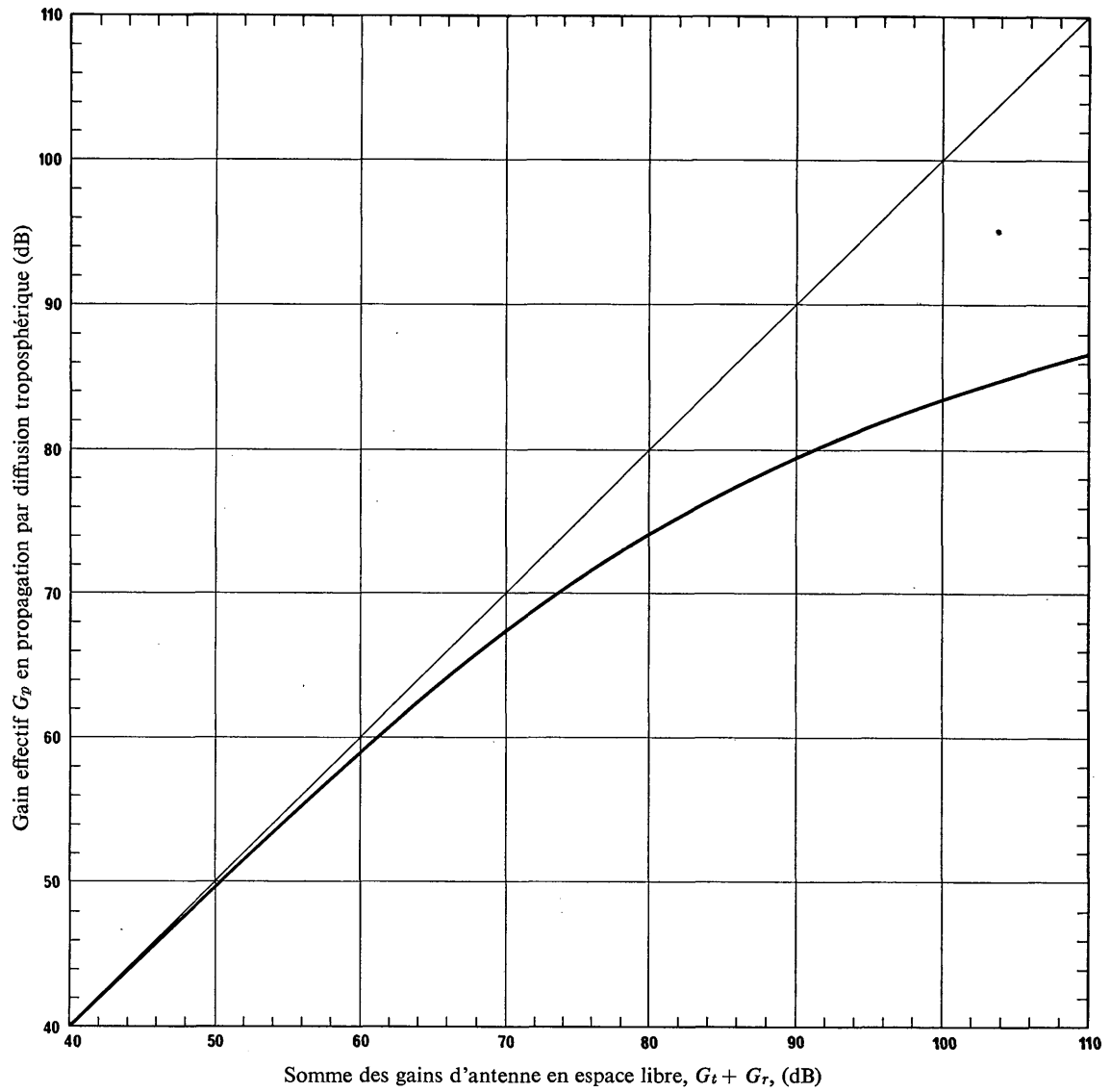


FIGURE 15

RAPPORT 241-2 *

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION
NÉCESSAIRES A LA PRÉVISION DE LA QUALITÉ
DE FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION
DE TERRE ET AU CALCUL DES BROUILLAGES SUR LES TRAJETS TERRESTRES**

Collecte de données

(1959 – 1963 – 1966 – 1974)

Les Programmes d'études 5A-2/5, 5B-1/5 et 5D-2/5 insistent, entre autres choses, sur le fait qu'il convient de recueillir des données sur la propagation concernant les faisceaux hertziens à visibilité directe et les faisceaux hertziens transhorizon pour que la Commission d'études 5 puisse réexaminer les méthodes actuelles de prévision de l'affaiblissement de transmission et mettre éventuellement au point de nouvelles méthodes. Celles-ci présenteraient de l'intérêt pour les autres Commissions d'études traitant de la conception des systèmes de télécommunication, en ce qui concerne tant les objectifs de qualité de fonctionnement que les possibilités d'éviter les brouillages.

Les administrations sont en conséquence invitées à communiquer d'urgence au Directeur du C.C.I.R. des données de propagation mesurées pendant des laps de temps significatifs sur des trajets en visibilité directe et sur des trajets transhorizon.

Les renseignements jusqu'ici publiés dans ce domaine sont particulièrement rares en ce qui touche:

- à l'affaiblissement de transmission sur les trajets à visibilité directe et les trajets transhorizon aux fréquences supérieures à 10 GHz et pour tous les pourcentages de temps;
- à l'affaiblissement de transmission sur les trajets transhorizon, notamment lorsqu'il s'agit de trajets situés dans des régions maritimes ou des régions de côtes basses, lorsque les fréquences sont supérieures à 1 GHz et lorsque les valeurs ne sont pas dépassées pendant des pourcentages de temps inférieurs ou égaux à 20 %;
- à l'affaiblissement de transmission sur les trajets transhorizon sans utilité pour le service (trajets de brouillage), caractérisés par des angles de l'horizon ou des angles de site des faisceaux d'antenne relativement grands à l'une ou l'autre ou aux deux extrémités du trajet, pour les fréquences supérieures à 100 MHz et pour des valeurs non dépassées pendant des pourcentages de temps inférieurs ou égaux à 20 %.

Pendant de petits pourcentages du temps et aux fréquences supérieures à 10 GHz, l'affaiblissement dû aux précipitations devient l'un des mécanismes les plus importants. Les données statistiques sur les taux des précipitations de surface et, éventuellement, sur le degré de corrélation entre données relatives à l'affaiblissement et données relatives aux précipitations seraient donc d'une grande utilité.

A titre provisoire, il est proposé de communiquer les données relatives à l'affaiblissement de transmission au Directeur du C.C.I.R., sous la forme prescrite dans la publication de l'U.I.T. intitulée « Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens » (Genève, 1965). Le Directeur du C.C.I.R. fera publier les nouvelles données en temps opportun. Les administrations sont priées d'avancer des suggestions visant à améliorer la présentation des résumés fondés sur les données.

* Adopté à l'unanimité.

RAPPORT 338-2 *

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE

(Programme d'études 5A-2/5)

(1966 – 1970 – 1974)

1. Introduction

Vu la grande importance de la propagation sur des trajets en visibilité directe dans la réalisation de faisceaux hertziens dans toutes les parties du monde, toutes les administrations ont été invitées à soumettre d'autres données se rapportant à ce sujet, en plus de celles qui ont été accumulées en grand nombre jusqu'à ce jour et des renseignements pertinents. En attendant, on fournit dans ce Rapport des renseignements généraux additionnels sur la propagation, qui pourront servir de base aux réalisateurs de faisceaux hertziens à visibilité directe. Notamment, l'étude statistique de nombreux enregistrements de l'affaiblissement de transmission a permis l'établissement de courbes de propagation générales.

Il existe certains faisceaux hertziens fonctionnant sur des fréquences inférieures à 1 GHz, mais le C.C.I.R. ne possède pas actuellement suffisamment de données concernant les caractéristiques de propagation pertinentes. On n'est donc pas en mesure de présenter des courbes typiques. On trouve cependant certains renseignements dans [C.C.I.R., 1966–1969a; Kinase et autres, 1967a et b; Kinase et Ito, 1969]. C'est pourquoi ce Rapport traite donc principalement des fréquences supérieures à 1 GHz.

2. Propagation en visibilité directe

Pour une surface lisse et parfaitement conductrice, l'affaiblissement, par rapport à l'espace libre, est donné par :

$$A = -6 - 10 \log \sin^2 (\pi \Delta r / \lambda) \quad \text{dB} \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde radioélectrique et $\Delta r = r_1 + r_2 - r_0$ est la différence de longueur entre le trajet direct et le trajet avec réflexion au sol (voir Fig. 1). Pour tenir compte de la réfraction moyenne des rayons, à la Fig. 1, on a considéré un rayon terrestre apparent a , plutôt que le rayon terrestre réel. La Fig. 2 représente les variations de a en fonction de $N_s = (n_s - 1) \times 10^6$, où n_s est l'indice de réfraction radioélectrique de l'atmosphère à la surface de la terre (voir le Rapport 233-3).

Pour les petits angles d'incidence, ψ , et pour des antennes situées à h_1 et h_2 (km) au-dessus de la surface terrestre, on a :

$$\Delta r \approx 2 h_1' h_2' / d \quad (2)$$

où h_1' et h_2' désignent les hauteurs des antennes au-dessus d'un plan tangent à la surface terrestre au point de réflexion.

Dans le cas où les antennes sont placées à la même hauteur au-dessus d'une terre sphérique de rayon apparent a :

$$\Delta r = d (\sec \psi - 1) \quad (3)$$

La distance maximale $d = d_0$ pour laquelle $A = 0$, peut être déterminée graphiquement d'après la relation

$$2h_1^2/d_0 = h_1 d_0/(2a) + d_0^3/(32a^2) = \lambda/6 \quad (4)$$

la somme des champs de l'onde directe et de l'onde réfléchi au sol devant être égale au champ en espace libre.

Soit θ_h l'angle de site du rayon direct r_0 par rapport à l'horizontale, à l'emplacement de l'antenne la plus basse (h_1) et supposons, d'une part, que $h_1 \leq h_2$, $h_1 \leq (9a \psi^2)/2$ et d'autre part que ψ est petit. On a alors :

$$\Delta r \approx 2h_1 \sin \psi \approx h_1 [\sqrt{\theta_h^2 + 4h_1/(3a)} + \theta_h] \quad (5)$$

où θ_h peut être positif ou négatif. Pour $\theta_h = 0$, on a $d_1 \approx 2h_1/(3\psi)$.

* Adopté à l'unanimité; l'attention de la Commission d'études 9 doit être attirée sur ce Rapport.

3. Effets de la réfraction

Les variations de la réfraction atmosphérique occasionnent parfois des évanouissements importants sur les liaisons en faisceaux hertziens à visibilité directe. On peut expliquer l'allure générale des variations de l'affaiblissement de transmission sur bien des trajets par deux mécanismes de propagation relativement simples: la réfraction liée à un gradient vertical de l'indice de réfraction variant avec le temps, et la formation d'interférences de phase dues à la diffraction et à la réflexion des ondes sur la surface de la terre et sur les discontinuités de l'indice de réfraction atmosphérique. La réfraction peut également être à l'origine d'évanouissements lorsque des conditions extrêmes ont pour effet que le rayon arrive sous un angle tel qu'il se trouve en dehors du faisceau principal de l'antenne de réception.

3.1 *Effet sur le dégagement du trajet*

Lorsque l'atmosphère est caractérisée par une infraréfraction suffisante (valeurs positives élevées du gradient de réfraction), les rayons sont courbés de telle manière que la terre paraît se trouver sur le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, ce qui donne lieu à un genre d'évanouissement appelé évanouissement par diffraction. On peut atténuer ce type d'évanouissement en installant des antennes à une hauteur suffisante pour que, dans des conditions de courbure très accentuée des rayons, le récepteur ne se trouve pas dans la région de diffraction.

Pour les faisceaux hertziens à visibilité directe, la théorie de la diffraction indique que le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur doit être dégagé de tout obstacle à partir d'une hauteur au-dessus du sol au moins égale à 60 % du rayon de la première zone de Fresnel, pour que les conditions de propagation en espace libre soient réalisées. Il convient également de prévoir une marge pour tenir compte d'une infraréfraction éventuelle; on le fait habituellement en s'assurant que le dégagement requis existe, même lorsque le rayon terrestre fictif est inférieur à sa valeur normale. Par exemple, aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni, les réalisateurs de faisceaux hertziens exigent souvent un dégagement égal à 60 % du rayon de la première zone de Fresnel, même lorsque le rayon terrestre fictif est de 4500 km seulement ($k = 0,7$). Toutefois, une analyse, faite au Royaume-Uni [C.C.I.R., 1963–1966a], des diagrammes correspondant à 300 000 heures d'enregistrement effectuées sur 21 sections de faisceaux hertziens, d'une conception plus ou moins conforme aux spécifications de dégagement précitées, n'a révélé aucun cas d'évanouissement dû à l'infraréfraction. On pourrait en conclure que la règle prescrite est trop prudente. Certaines administrations exigent que le dégagement corresponde à un rayon entier de la zone de Fresnel, lorsque le rayon terrestre fictif a sa valeur normale de 8500 km ($k = 1,33$). Ce dégagement est généralement inférieur à celui qui est exigé aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni. Des mesures effectuées en République Fédérale d'Allemagne [Kinase et Ito, 1969] ont montré que le dégagement total de la première zone de Fresnel avec $k = 4/3$ (50 % du temps) n'est pas suffisant pour éviter les évanouissements de diffraction dans le cas de trajets de longueurs supérieures à 100 km. Le trajet direct doit être en plus libre de tout obstacle pour $k = 1$ (99 % du temps en République Fédérale d'Allemagne).

Dans les cas où l'on dispose de statistiques relatives aux conditions d'infraréfraction, on peut remplacer éventuellement cette règle élémentaire par une méthode plus précise tenant compte de l'indice réel d'infraréfraction que l'on peut s'attendre à rencontrer dans diverses régions.

En résumé, il est largement démontré qu'un dégagement correspondant à 60 % de la première zone de Fresnel, pour un rayon terrestre fictif de 4500 km, est bien suffisant pour éviter les évanouissements dus à l'infraréfraction. Cependant, il se peut qu'en certaines circonstances un dégagement moins important soit suffisant, et parfois même avantageux, sur des terrains présentant des conditions propices à la réflexion. Toutefois, on ne dispose malheureusement pas encore d'éléments suffisants pour suggérer dans quelle mesure le dégagement pourrait être réduit avec sécurité.

Il y a cependant lieu de souligner que, pour ce qui est de la propagation des ondes, les valeurs extrêmes du gradient de l'indice de réfraction mesurées en un point sont moins importantes qu'on pourrait le supposer. Ces valeurs extrêmes correspondent à des conditions atmosphériques inhabituelles qui règnent sur une distance probablement très courte et en général inférieure à la longueur de la liaison radioélectrique. Il convient donc de considérer également la corrélation dans l'espace des gradients de l'indice de réfraction en deux points du trajet, mais cette question n'a pas été suffisamment étudiée. Le gradient de l'indice de réfraction mesuré en un point (et surtout ses valeurs extrêmes) ne doit donc être utilisé qu'avec une grande prudence.

On a démontré qu'une valeur effective minimale de k peut être déduite en fonction de la longueur du trajet pour un climat tempéré continental, comme le montre la Fig. 3 [Boithias et Battesti, 1967].

On trouvera dans le Rapport 233-3 des exemples de mesures du gradient de l'indice de réfraction, effectuées dans un certain nombre de pays.

3.2 *Effet sur la variation de l'angle d'arrivée*

Une variation de l'indice de réfraction atmosphérique peut causer des changements dans l'angle apparent d'arrivée du rayon direct en particulier dans le plan vertical et peut donc, en principe, causer une réduction du gain des antennes utilisées aux extrémités du trajet radioélectrique.

Des mesures faites en Angleterre [Bell, 1967] à la fréquence 11 GHz sur un trajet de 55 km n'ont pas montré, pendant une période d'une année, de variations supérieures à ± 7 minutes d'arc.

Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1966-1969a], à la fréquence 515 MHz, sur un trajet de 70 km, ont donné des résultats sensiblement du même ordre.

Cependant, des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [Crawford et Jakes, 1952; Sharpless, 1946] sur un trajet court (28 km), aux fréquences 4 et 24 GHz, ont montré que l'angle d'arrivée peut subir des variations rapides allant jusqu'à $0,75^\circ$ de part et d'autre de la ligne normale de visibilité directe. La variation dans le plan horizontal est d'ordinaire bien plus faible, de l'ordre de $0,1^\circ$.

Les variations de l'angle d'incidence mesurées pour plusieurs trajets radioélectriques au Japon concordent assez bien avec les variations prévues d'après les données statistiques radiométéorologiques relatives à ΔN et à $\sigma_{\Delta N}$ dans le premier kilomètre de la couche, et d'après l'épaisseur ΔH de la couche au-dessus de laquelle se propagent les ondes [Ikegami et autres, 1968].

3.3 *Effet sur la propagation par trajets multiples*

La propagation par trajets multiples se présente sous deux aspects: par réflexion sur la terre ou sur l'eau et par réflexion ou réfraction sur des non-homogénéités de l'atmosphère.

Dans certaines conditions, le rayon direct est perturbé par les ondes réfléchies sur le sol ou par celles qui suivent des trajets multiples. Les évanouissements les plus profonds se produisent au moment où l'on se trouve en présence de deux composantes effectives, du même ordre d'amplitude. Des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [Crawford et Jakes, 1952] ont montré qu'il peut exister jusqu'à six composantes à la fois.

Les mesures de propagation par trajets multiples effectuées au Japon [Nomura et autres, 1967] montrent que la plupart des évanouissements profonds sont causés par des interférences entre deux rayons dominants et que la différence de longueur entre les trajets de ces rayons varie considérablement selon les conditions qui règnent sur le trajet de propagation. Des différences maximales de 2 m et 20 cm ont été observées respectivement sur un trajet maritime et sur un trajet terrestre. Le rapport d'amplitude entre les rayons multiples variait rapidement entre des limites étendues, ce qui donne une densité de probabilité presque uniforme. On a mis au point, et vérifié expérimentalement, une méthode qui permet d'évaluer les caractéristiques de propagation par trajets multiples en se fondant sur la probabilité d'évanouissements.

S'il arrive que le trajet passe au-dessus de plans d'eau et si son tracé est tel que le point de réflexion spéculaire tombe sur la surface de l'eau, il peut se produire des évanouissements très importants, avec des minima dont la valeur peut être parfois inférieure à celle estimée à l'aide du modèle à deux rayons. Ce comportement peut être présenté par un modèle dans lequel on tient compte des ondes secondaires, en plus des deux ondes primaires [C.C.I.R., 1963-1966b]. Si on ne peut pas éviter de tels trajets, on peut recourir à la diversité en hauteur ou en fréquence pour diminuer les évanouissements. On a constaté d'autre part que, s'il est possible d'aménager le trajet de telle manière que le point de réflexion sur le plan d'eau soit masqué par le terrain pour l'une ou l'autre des extrémités du trajet, même si le plan d'eau reste visible des deux extrémités, les évanouissements peuvent être réduits dans des proportions appréciables. Toutefois, des essais faits sur un trajet de 80 km de longueur passant au-dessus de l'eau [Giugliarelli, 1965] ont montré qu'il était très difficile de réaliser la transmission de signaux complexes (télévision en couleur, par exemple) si le plan d'eau n'était pas entièrement invisible de l'une des extrémités au moins.

Dans des conditions normales et sur des trajets maritimes ou terrestres comportant relativement peu d'irrégularités, on peut s'attendre à ce qu'une partie de l'onde réfléchi au sol soit diffusée hors du trajet de propagation [NBS, 1967]. Cependant, dans des conditions de superréfraction atmosphérique et lorsque la terre paraît concave, l'onde réfléchi est renforcée du fait de la convergence des rayons associés.

Des essais faits en République Fédérale d'Allemagne [Fehlhaber et Grosskopf, 1965] ont montré qu'il peut se produire une réflexion totale par une couche atmosphérique proche du sol, cette couche étant généralement liée à la présence de brume ou de brouillard au-dessus de vallées humides ou de régions marécageuses. Des études effectuées antérieurement au Royaume-Uni [Smith-Rose et Stickland, 1946] montrent également qu'il existe une corrélation entre les évanouissements et l'existence de brouillard bas.

Les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples causés par la formation de couches dans l'atmosphère présentent une fréquence et une durée qui sont en relation avec la structure de l'indice de réfraction dans le temps; en d'autres termes, les plus mauvaises conditions de propagation se produisent lors de périodes de stratification extrême de l'atmosphère. Dans les climats tempérés et au-dessus de trajets terrestres, ces conditions se manifestent normalement la nuit et pendant les premières heures de la matinée des jours d'été.

Des variations rapides de l'indice de réfraction sur une hauteur de plusieurs dizaines de mètres au-dessus de la surface terrestre ont également été observées; elles peuvent être à l'origine de phénomènes de propagation par trajets multiples [Fehlhaber et Grosskopf, 1965].

4. Statistiques des évanouissements

L'étude faite au Royaume-Uni des 27 sections de faisceaux hertziens [C.C.I.R., 1963-1966a] — longueur des sections inférieure à 100 km — a montré que, par rapport au niveau du signal en espace libre, la profondeur des évanouissements dépassés pendant un faible pourcentage de temps dépend, en première approximation, de la longueur du trajet et du type de terrain traversé: mais elle dépend assez peu de la fréquence, dans la gamme comprise entre 2 et 6 GHz.

En revanche, des travaux effectués en France [Battesti et Boithias, 1964], sur des trajets de plus de 100 km, montrent que les évanouissements ne dépendent que dans une faible mesure de la nature du terrain et davantage de la fréquence utilisée.

On a constaté que les résultats obtenus au Royaume-Uni et en France concordent assez bien, si l'on tient compte du fait que les longueurs des trajets respectifs diffèrent considérablement. A titre d'indication générale, les réalisateurs de faisceaux hertziens en Europe trouveront à la Fig. 4 des courbes provisoires fondées sur les résultats obtenus au Royaume-Uni et en France. Ces courbes donnent la distribution des profondeurs d'évanouissement relatives à l'espace libre pendant le mois le plus mauvais de l'année, par rapport aux valeurs en espace libre, pour diverses longueurs de trajet traversant un terrain moyen et pour les conditions climatiques du nord-ouest de l'Europe. La fréquence utilisée est 4 GHz. Dans ces conditions, les courbes correspondent aux données originales avec un écart type d'environ 4 dB. Il convient d'être extrêmement prudent si l'on désire appliquer ces courbes provisoires dans des conditions différentes, en ce qui concerne le climat, le terrain ou le dégagement du trajet.

En République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1970-1974a], on a trouvé la même loi de distribution pour l'affaiblissement par rapport à l'espace libre pendant le mois le plus mauvais, sur six trajets différents bien que les distances varient de 69 à 142 km et les fréquences de 2 à 7 GHz. Cette loi de distribution correspond à la courbe 75 km de la Fig. 4. Dans tous les cas la première zone de Fresnel était dégagée pendant au moins 50 % du temps et le trajet direct était en plus libre de tout obstacle pendant 99 % du temps. Cette distribution statistique semble être une distribution limite pourvu que les conditions de dégagement mentionnées ci-dessus soient satisfaites. Il y a peut-être une légère dépendance des conditions climatiques.

Les corrections de première approximation, pour les différentes fréquences, sont les suivantes: à 2 GHz, la profondeur des évanouissements dépassée pendant 1 % du temps est inférieure à celle donnée à la Fig. 4, d'une valeur variant de 0,5 dB pour 50 km à 5 dB pour 250 km; à 6 GHz, la profondeur des évanouissements dépassée pendant 1 % du temps est supérieure à celle donnée à la Fig. 4, d'une valeur variant d'environ 1 dB pour 50 km à 6 dB pour 250 km.

Pour des trajets de moins de 100 km passant au-dessus d'un terrain assez régulier, la profondeur des évanouissements dépassée pendant 0,01 % du temps est d'environ 6 dB supérieure à celle indiquée à la Fig. 4 et, si le trajet passe au-dessus de plans d'eau, de vallées humides ou de régions marécageuses, la profondeur des évanouissements peut être de 12 dB supérieure à celle indiquée à la Fig 4. Des mesures faites aux Pays-Bas à 7 GHz ont montré que, dans une région plate et humide, on peut observer des évanouissements encore plus profonds [C.C.I.R., 1970-1974b]. Les observations faites sur un trajet de 100 km, à la fréquence de 6 GHz, ont montré que les évanouissements importants peuvent se produire même sur un trajet très irrégulier.

En U.R.S.S., une méthode a été mise au point pour le calcul de la répartition statistique de la profondeur des évanouissements, en fonction de la longueur du trajet, du profil du terrain, du climat, de la hauteur d'antenne et de la fréquence [C.C.I.R., 1963]. Des mesures faites en U.R.S.S. [C.C.I.R., 1970-1974c] ont montré que la répartition statistique de la durée des évanouissements obéit en première approximation à la loi logarithmique normale. La valeur médiane de la durée des évanouissements varie en sens inverse de leur profondeur; elle diminue lorsque la longueur de la section du faisceau hertzien augmente et augmente avec le dégagement relatif du trajet. L'écart type varie en sens inverse de la profondeur des évanouissements et augmente légèrement avec la fréquence; il dépend peu des caractéristiques physiques du trajet et des conditions atmosphériques.

Des mesures faites aux environs de Dresde sur un trajet de 56 km [C.C.I.R., 1966-1969b], il résulte que, dans cette région, il y a de faibles différences entre les évanouissements à 8 et à 11 GHz. La profondeur des évanouissements à 11 GHz entre 50 et 99,9 % atteint une valeur moyenne annuelle de 24 dB. Cette valeur était seulement d'environ 21 dB à 8 GHz. La diversité de fréquence à 11 GHz, avec un espacement de 240 MHz entre les fréquences, se traduit par une amélioration de 5 dB pendant 99,9 % du temps. Les variations journalières et saisonnières des évanouissements sont analogues aux valeurs mentionnées par différents auteurs pour des fréquences plus basses. La valeur maximale des évanouissements dus aux averses orageuses survenant en été a été observée principalement en fin d'après-midi. D'après une analyse des taux de précipitations à deux stations pluviométriques distantes de 50 km, les distributions des précipitations ont été sensiblement les mêmes.

Le degré de coïncidence entre les augmentations du bruit horaire moyen imputables aux évanouissements sur un trajet et les augmentations sur un autre trajet du même système, est un problème qui présente de l'intérêt pour les constructeurs des systèmes. Des mesures faites au Royaume-Uni [Turner et autres, 1966] indiquent qu'il est peu justifié, pour calculer les performances d'un faisceau hertzien en ce qui concerne la moyenne horaire du bruit, de supposer que les mauvaises heures se produisent simultanément sur tous les trajets.

Pour la construction de faisceaux hertziens conformes aux Avis du C.C.I.R., il faut déterminer la probabilité d'apparition d'évanouissements profonds pendant de très petits pourcentages de temps (0,0002 % environ, par exemple, pour un bond moyen de l'ordre de 50 km). Afin de surmonter des difficultés que l'on pourrait rencontrer pour estimer la profondeur des évanouissements pour de si petits pourcentages de temps, on a mis au point une méthode fondée sur la probabilité d'apparition d'évanouissements de type Rayleigh [Morita et Kakita, 1958; Morita, 1970; C.C.I.R., 1970-1974d]. Cette méthode s'applique aux trajets dégagés à visibilité directe, avec une réflexion négligeable sur la surface terrestre.

La probabilité d'apparition d'évanouissements, Pr a pour expression:

$$Pr(W) = K \cdot Q \cdot \frac{W}{W_0} \cdot f^B \cdot d^{3,5} \quad (6)$$

où d : longueur du trajet (km)

f : fréquence (GHz)

W_0 : puissance reçue en l'absence d'évanouissements

$Pr(W)$: probabilité pour que la puissance reçue soit égale ou inférieure à W .

Cette formule s'applique uniquement aux évanouissements supérieurs à 15 dB environ.

Au Japon, on a constaté que les valeurs ci-après seraient acceptables pour la saison la plus défavorable:

$$\left. \begin{aligned} B &= 1,2 \\ K &= 0,97 \times 10^{-9} \\ Q &= 0,4 \text{ (au-dessus des montagnes)} \\ &= 1,0 \text{ (au-dessus des plaines)} \\ &= \frac{72}{\sqrt{\frac{h_1 + h_2}{2}}} \text{ (au-dessus de la mer ou du littoral)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

h_1 et h_2 sont exprimés en mètres.

Pour la partie nord-ouest de l'Europe, on a trouvé que les valeurs suivantes de Q , B et K sont acceptables pour le mois le plus défavorable:

$$\left. \begin{aligned} B &= 1 \\ K &= 1,4 \times 10^{-8} \\ Q &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

On a également élaboré au Japon une méthode pour évaluer les évanouissements de type Rayleigh pour le cas où la réflexion sur la surface terrestre n'est pas négligeable [Morita, 1972].

5. Réception en diversité

La propagation par trajets multiples donne des évanouissements maximaux lorsque l'on a affaire à deux composantes effectives ayant la même intensité. On peut réduire ces évanouissements en ayant recours à des systèmes de réception en diversité (par exemple, diversité de fréquence ou diversité d'espace). Des faisceaux hertziens dotés de l'équipement de réception en diversité capable de remédier à ce type d'évanouissements fonctionnent de façon tout à fait satisfaisante [Albertson, 1964; Cabessa, 1955; Lewin, 1962].

Sur les trajets courts passant au-dessus de plans d'eau, les effets de diversité peuvent être représentés par un modèle à deux rayons. Sur les trajets plus longs, on pourra être obligé d'employer la réception en diversité tant sur les trajets terrestres que sur les trajets passant au-dessus de plans d'eau, bien que le modèle à deux rayons ne soit plus applicable. On a mis au point des méthodes permettant de déterminer l'espacement des antennes ou la séparation entre fréquences nécessaire pour protéger la réception en diversité contre les évanouissements profonds. Certaines méthodes [Lewin, 1962; Norton et autres, 1965], fondées sur un modèle à deux rayons qui tirent parti de la variation mesurée du gradient de l'indice de réfraction au voisinage de la surface terrestre, supposent que le signal reçu se compose d'une onde directe et d'une onde réfléchie d'amplitudes approximativement égales mais dont les phases varient en fonction du gradient de l'indice de réfraction. Une méthode applicable à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère a été mise au point au Japon; des vérifications expérimentales ont été effectuées [C.C.I.R., 1963-1966c].

Des études effectuées en France et en Italie [C.C.I.R., 1966-1969c] indiquent qu'un espacement vertical de 150 longueurs d'ondes est souhaitable pour réduire les évanouissements dus aux trajets multiples dans l'atmosphère. Des mesures effectuées en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1970-1974e] montrent que la corrélation entre les signaux ne décroît pas de façon monotone avec l'espacement entre les antennes et qu'on doit en tenir compte pour exprimer l'espacement optimal de diversité en longueurs d'ondes.

En Italie [C.C.I.R., 1966-1969c], on a effectué des mesures sur un trajet maritime de grande longueur pour étudier l'efficacité de la diversité d'espace du point de vue de la qualité du signal transmis. Ces mesures ont montré qu'un système à diversité d'espace par commutation, commandé par le champ reçu, peut avoir une efficacité suffisante pour améliorer la réception, principalement pendant les périodes où il se produit des évanouissements profonds.

Des mesures en diversité de fréquence, faites sur 2,5 GHz en République Fédérale d'Allemagne et sur 2 GHz en Italie [C.C.I.R., 1963–1966 b et d], ont montré que pour des trajets de longueur comprise entre 50 et 70 km, il faut prévoir un espacement de fréquence de 150 à 200 MHz si l'on veut obtenir une réception en diversité efficace; en revanche, sur des trajets de 120 km, l'espacement de fréquence peut être ramené à 80 MHz.

Des mesures effectuées par l'Administration française, sur un trajet de 106 km de longueur situé dans la République Fédérale du Cameroun et sur la fréquence de 6 GHz, ont montré qu'il est possible de réduire la corrélation entre les signaux reçus sur deux antennes disposées de telle façon que l'une soit orientée légèrement plus haut que le trajet direct, ce qui revient à créer un système à diversité angulaire.

A la suite de nombreuses mesures expérimentales effectuées par plusieurs administrations [Battesti et Boithias, 1964; Makino et Morita, 1965; Kaylor, 1953], on a tracé les courbes de la Fig. 5 [Boithias et Battesti, 1967] qui donnent l'amélioration apportée par la diversité d'espace ou de fréquence. Ces courbes sont valables pour le mois le plus défavorable sur des liaisons où les évanouissements sont importants et pour des fréquences comprises entre 2 et 10 GHz environ. Pour des fréquences inférieures, l'amélioration serait probablement un peu meilleure. Pour la diversité d'espace, l'espacement vertical entre les antennes est supposé supérieur à environ 150 longueurs d'onde.

Des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [McGavin et autres, 1968; Skerjanec, 1968] ont permis de comparer l'efficacité de la diversité de fréquence et de la diversité d'espace. Elles ont mis en évidence le fait que les méthodes couramment suivies pour les projets de liaisons dont le trajet survole la mer ou un terrain régulier ne conviennent pas, en général, au cas où le trajet survole un terrain irrégulier.

6. Effets sur la modulation dus à la propagation par trajets multiples dans les systèmes de faisceaux hertziens à multiplexage par répartition en fréquence et à modulation de fréquence

La propagation par trajets multiples dans l'atmosphère est responsable d'une partie du bruit thermique et du bruit d'intermodulation qui prennent naissance dans un système à modulation de fréquence. Au Royaume-Uni, on a mesuré pendant une longue période l'amplitude et le temps de propagation de signaux transmis par trajets multiples; ces mesures ont été faites à 4 GHz [Meadows et autres, 1966] sur un trajet de 55 km et 11 GHz [Turner et autres, 1966] sur un trajet de 58 km. Elles ont révélé que le bruit d'intermodulation ainsi produit dans un système de téléphonie de moins de 600 voies ne serait pas important. Il en est peut-être autrement sur d'autres trajets et dans des climats différents de ceux rencontrés au Royaume-Uni.

Des études théoriques et expérimentales effectuées au Japon [Nomura et autres, 1967] ont montré que les réflexions du sol peuvent donner une distribution du bruit total plus défavorable que celle provenant du seul bruit thermique, même pour des trajets de propagation comportant peu de réflexions par le sol.

Au Japon, une méthode statistique permettant d'évaluer la distorsion due aux interférences entre deux rayons a été mise au point et vérifiée par des mesures expérimentales avec charge de bruit sur le trajet de propagation. D'après ces essais, la distorsion due à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère n'affectait pas beaucoup le fonctionnement d'un faisceau hertzien ayant une capacité de 2700 voies téléphoniques et une excursion de fréquence de 100 kHz par voie. Une autre expérience qui a été faite à 4 GHz sur un trajet maritime de 37,2 km comportant une onde réfléchie sur la mer, a aussi montré [C.C.I.R., 1970–1974f] que:

- la distribution cumulative des durées de remontées de bruit, mesurées avec une constante de temps inférieure à la seconde peut être représentée par une loi log-normale;
- le bruit du circuit en réception simple présente des variations saisonnières très marquées;
- la réception en diversité d'espace avec un espacement d'antennes égal à la moitié de la hauteur d'un lobe d'interférence, contribue beaucoup à réduire à la fois le bruit thermique et le bruit d'intermodulation.

Des résultats similaires ont été obtenus en République Fédérale d'Allemagne [C.C.I.R., 1970–1974e] en utilisant la réception en diversité par commutation. Des mesures faites sur un très long trajet (138 km) sous incidence rasante, avec un faisceau hertzien à 6 GHz ayant une capacité de 1800 voies téléphoniques,

ont mis en évidence une augmentation notable du bruit d'intermodulation de même que de fortes variations du niveau dans la bande de base pendant de petits pourcentages du temps [Fehlhaber, 1973]. Ces deux effets sont attribués à la propagation par trajets multiples causée par la réflexion sur les couches atmosphériques; ils peuvent être prévus par la théorie [Fehlhaber, 1971a et b].

Une méthode pour calculer la distorsion, quand plusieurs ou un grand nombre de composantes d'ondes sont présentes simultanément dans le signal reçu, avec des phases d'égales probabilités entre 0 et 2π , a été mise au point en Suède [Rue, 1971].

En France, des mesures effectuées sur un trajet de 95 km, avec un faisceau hertzien de 1800 voies à 6 GHz, ont montré que le bruit d'intermodulation était peu important [C.C.I.R., 1966-1969d].

7. Réduction du découplage entre polarisations orthogonales due à la propagation

Des expériences effectuées en France [Lefrançois et autres, 1973] et au Japon [Morita, 1971], à 6 GHz sur des distances supérieures à 70 km et à 7 GHz sur une distance de 50 km, ont montré que le découplage entre polarisations horizontale et verticale pouvait descendre au-dessous de 15 dB pendant 0,01 % du temps alors que le découplage dû aux antennes était supérieur à 40 dB pour le rayonnement dans l'axe du faisceau de ces antennes.

Cet effet peut être dû soit à une combinaison des effets troposphériques et des caractéristiques de l'antenne, soit uniquement à l'influence de la troposphère.

Dans le premier cas, la variation du découplage entre polarisations croisées s'explique par les variations de l'angle d'arrivée des ondes, compte tenu du diagramme de polarisations croisées des antennes.

Dans le second cas, la variation du découplage peut être attribuée notamment à l'existence de couches réfléchissantes inclinées ou à l'influence des précipitations.

On a constaté aussi que la réception en diversité d'espace améliorerait le découplage entre polarisations croisées.

Des expériences faites au Japon en polarisations rectilignes, verticale et horizontale [Shimba et Morita, 1972; Yamamoto et autres, 1973], ainsi qu'aux Etats-Unis [Barnett, 1972] dans la bande des 20 GHz et sur des trajets compris entre 2,8 km et 5,0 km, ont montré que le découplage entre polarisations croisées diminue en cas de fortes précipitations. Les résultats indiquent que la relation moyenne entre les valeurs d'affaiblissement qu'on obtient avec la même polarisation et la discrimination de polarisations croisées — valeurs d'affaiblissement dépassées pendant les mêmes pourcentages de temps — peut être représentée par l'expression suivante:

$$D = -0,4A + 35,5$$

où $15 \leq A \leq 50$

et D : discrimination de polarisations croisées (dB),

A : affaiblissement supplémentaire entre mêmes polarisations (dB).

Lorsqu'on établit les plans de faisceaux hertziens utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz, il convient donc de tenir compte du croisement de polarisations provoqué par la pluie.

Une expérience faite en Suisse [C.C.I.R., 1970-1974g] en polarisation circulaire à 13 GHz, sur un trajet de 10 km avec un angle de site de 14° , a mis en évidence une corrélation étroite entre l'affaiblissement du signal entre mêmes polarisations et le couplage de polarisations croisées durant de fortes pluies.

8. Renseignements supplémentaires concernant les fréquences supérieures à 10 GHz *

8.1 Affaiblissement

La propagation des hyperfréquences à travers l'atmosphère s'accompagne d'un affaiblissement qui est dû à l'absorption et à la dispersion par les hydrométéores (pluie, grêle, neige et brouillard) ainsi qu'à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau. Cet affaiblissement, généralement négligeable au-dessous de 10 GHz, peut devenir considérable aux fréquences plus élevées, surtout au-delà de 15 GHz. Par conséquent, lorsqu'on fait le projet de faisceaux hertziens destinés à fonctionner dans ces bandes, l'affaiblissement dû aux hydrométéores est un facteur dont l'importance augmente avec la fréquence, les hydrométéores pouvant même finir par constituer la source d'affaiblissement la plus sérieuse. Le Rapport 563 donne une description sommaire des caractéristiques et de l'étendue des précipitations.

Les affaiblissements linéiques pour les fréquences supérieures à 10 GHz sont étudiés dans le Rapport 233-3, qui contient également une méthode permettant de calculer la précipitation équivalente horizontale, c'est-à-dire la précipitation homogène sur le trajet, qui donnerait le même affaiblissement que les précipitations hétérogènes réelles.

De nombreuses administrations ont effectué des mesures d'affaiblissement sur diverses fréquences et diverses distances. En ce qui concerne les fréquences inférieures à 50 GHz on trouvera des résultats de mesure aux références suivantes: [Takada et autres, 1968; Hogg; Hickin, 1968; Harrold, 1967; Bleviss et autres, 1967; C.C.I.R., 1970-1974h, i, j, k et l].

Les mesures ont montré que si l'on considère le mois le plus défavorable sur plusieurs années, on constate qu'il existe de grandes différences entre les affaiblissements dus aux précipitations qui sont dépassés pendant de petits pourcentages du temps [C.C.I.R., 1970-1974j et k].

Le Tableau I représente les résultats de mesures comparatives effectuées dans la partie sud de l'Angleterre [C.C.I.R., 1966-1969e] au sujet de l'affaiblissement aux fréquences 11, 18 et 36 GHz sur un trajet de 24 km de longueur.

Aux fréquences supérieures à 50 GHz, les études sont moins nombreuses. Des calculs basés sur des travaux effectués aux Etats-Unis d'Amérique [Weibel et Dressel, 1967] montrent qu'au Royaume-Uni [Lane, 1968; C.C.I.R., 1966-1969f], à la fréquence 100 GHz, sur une liaison de 2 km de longueur utilisant la technique de la modulation par impulsions et codage, une valeur de 20 μ W serait appropriée, sauf dans le cas de précipitations dépassant 25 mm/h, ce qui se produit pendant 0,008 % du temps. Pour une liaison de 6 km, une fiabilité assurée pendant 99,99 % du temps nécessiterait cependant une puissance de l'émetteur de 5 W, en supposant que les caractéristiques du récepteur sont les mêmes. De même, des mesures effectuées pendant 1 an à la fréquence de 110 GHz sur une distance de 2,6 km [Llewellyn-Jones et Zavody, 1972] montrent que l'utilisation de telles fréquences est possible pour établir des faisceaux hertziens de courte longueur, avec une fiabilité acceptable.

Dans un projet de faisceaux hertziens, on doit évidemment tenir compte non seulement des évanouissements dus aux précipitations, mais aussi des évanouissements dus aux trajets multiples dans l'atmosphère, qui existent à toutes les fréquences.

Pour toutes les fréquences, il existe un pourcentage de temps qui varie selon le climat, au-dessus duquel la pente de la courbe de distribution des affaiblissements dus à la pluie est plus forte que pour les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples. Pendant un pourcentage de temps qui présente un intérêt pratique, au Royaume-Uni et aux Pays-Bas [Turner et autres, 1966; Bell, 1967; Morita, 1971], l'affaiblissement par la pluie à 11 et 12 GHz respectivement ne constitue un facteur prépondérant ni sur une base mensuelle ni sur une base annuelle. Par contre, au Japon [Ugai et Kaneda, 1963] l'affaiblissement par la pluie est le facteur prépondérant au-dessus de 10 GHz. En République Fédérale d'Allemagne, on a constaté qu'aux fréquences comprises entre 9 et 12 GHz et pour des longueurs de trajet comprises entre 25 et 70 km, tous les types d'évanouissements peuvent être prédominants.

Comme les trajets multiples apparaissent surtout lorsque l'atmosphère est stratifiée, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de précipitations importantes, il suffit d'ajouter les pourcentages correspondant à ces deux causes d'évanouissements. Cependant si on envisage la réception en diversité on doit traiter séparément ces deux phénomènes, car les évanouissements dus aux trajets multiples peuvent être corrigés par un écart vertical de quelques mètres entre les antennes, alors que pour réduire les évanouissements dus aux précipitations il faudra choisir des trajets de manière qu'ils soient séparés de plusieurs kilomètres.

* Voir également le Rapport 234-3 qui donne aussi des renseignements concernant les faisceaux hertziens à visibilité directe.

Bien qu'il convienne de considérer ces résultats comme n'ayant qu'un caractère provisoire — en attendant des renseignements plus détaillés sur les caractéristiques de précipitations intenses — ils peuvent déjà fournir une indication sur la possibilité de réalisation pratique des faisceaux hertziens.

8.2 Scintillation

Bien que le phénomène de scintillation existe à toutes les fréquences, il prend une importance particulière au-dessus de 10 GHz.

Dans le cas d'évanouissements dus à la scintillation, on estime qu'avec des antennes paraboliques dont le diamètre peut atteindre quelques mètres, l'ordre de grandeur des fluctuations crête-à-crête qui se produisent parfois sur des faisceaux hertziens dont les extrémités sont situées à une hauteur de 10 ou 20 mètres environ est le suivant:

à 100 GHz: ± 1 dB à 2 km; ± 5 dB à 10 km,
à 35 GHz: ± 3 dB à 10 km; ± 8 dB à 50 km.

Dans l'étude de certains problèmes (par exemple, le calcul de la diminution du gain dans les grandes antennes), il est souvent nécessaire de faire une estimation des différences de phase pouvant se produire dans le front de l'onde. On peut aussi faire ces calculs en se fondant sur la théorie et en postulant certains modèles de profils de l'indice de réfraction. Avec un espacement de 6 m, on estime que, pour des petits pourcentages de temps, la valeur quadratique moyenne de la différence de phase dans le front de l'onde, dans les liaisons de Terre (faisceaux hertziens), peut atteindre les valeurs ci-après:

à 100 GHz: 30° à 2 km; 70° à 10 km,
à 35 GHz: 25° à 10 km; 55° à 50 km.

Bien que les résultats indiqués se fondent en grande partie sur des considérations théoriques, ils concordent assez bien avec les quelques résultats expérimentaux dont on dispose. Il convient, toutefois, de les utiliser avec prudence tant qu'on n'aura pas effectué des études théoriques et expérimentales plus complètes.

9. Conclusions

Les indications ci-dessus peuvent servir de directives générales aux réalisateurs de liaisons en faisceaux hertziens à visibilité directe. Bien que ces renseignements soient fondés sur un grand nombre de données, il n'est pas encore possible de déterminer des directives plus précises, aussi convient-il d'être prudent dans l'utilisation du présent Rapport. Il n'est notamment pas possible de déterminer avec précision les conséquences d'une importante réduction du dégagement du trajet par rapport aux valeurs déduites de la règle simple donnée au § 3.1

TABLEAU I

Profondeur d'évanouissement dépassée pendant le pourcentage de temps indiqué

Fréquence (GHz)	Période:							
	année entière				mois le plus défavorable			
	0,001 %	0,01 %	0,1 %	1,0 %	0,001 %	0,01 %	0,1 %	1,0 %
	Profondeur d'évanouissement (dB)							
11	15	8	2	0	24	14	1	0
18	34	18	7	2	>50	26	7	0
36	>50	>50	38	9	>50	>50	>50	31

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERTSON, J.N. [novembre 1964] Space diversity on the microwave system of the Southern Pacific. *Wire Radio Commun.*, 83-87.
- BARNETT, W.T. [1972] Some experimental results on 18 GHz propagation. *IEEE National Telecommunication Conference*, 10E-1-4.
- BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [juillet-août 1964] Etude des sections longues dans les faisceaux hertziens en visibilité. *Ann. des télécomm.*
- BELL, J. [1967] Propagation measurements at 3, 6 and 11 GHz over a line-of-sight radio path. *Proc. I.E.E.*, 114, 5, 545.
- BLEVIS, B.C., DOHOO, R.M. et MCCORMICK, K.S. [1967] Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. *IEEE Trans.*, AP-15, 394-403.
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1967] Protection contre les évanouissements sur les faisceaux hertziens à visibilité. *Ann. des télécomm.*
- CABESSA, R. [1955] Réalisation de liaisons par faisceaux hertziens de qualité sur des trajets maritimes en Grèce. *L'Onde Electrique*, 35, 714-727.
- C.C.I.R. [1963] Doc. V/196, U.R.S.S.
- C.C.I.R. [1963-1966a] Doc. V/11, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1963-1966b] Doc. V/106, Italie.
- C.C.I.R. [1963-1966c] Doc. V/102, Japon.
- C.C.I.R. [1963-1966d] Doc. V/23, République Fédérale d'Allemagne.
- C.C.I.R. [1966-1969a] Doc. V/3, République Fédérale d'Allemagne.
- C.C.I.R. [1966-1969b] Doc. V/139, O.I.R.T.
- C.C.I.R. [1966-1969c] Doc. V/53, Italie.
- C.C.I.R. [1966-1969d] Doc. IX/186, France.
- C.C.I.R. [1966-1969e] Doc. IX/164, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1966-1969f] Doc. V/1, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/3, Allemagne (République Fédérale d').
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/54, Pays-Bas.
- C.C.I.R. [1970-1974c] Doc. 5/78, U.R.S.S.
- C.C.I.R. [1970-1974d] Doc. 5/190, France.
- C.C.I.R. [1970-1974e] Doc. 5/4, Allemagne (République Fédérale d').
- C.C.I.R. [1970-1974f] Doc. 5/36, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974g] Doc. 5/194, Suisse.
- C.C.I.R. [1970-1974h] Doc. 5/55, Pays-Bas.
- C.C.I.R. [1970-1974i] Doc. 5/63, France.
- C.C.I.R. [1970-1974j] Doc. 5/180, France.
- C.C.I.R. [1970-1974k] Doc. 5/181, France.
- C.C.I.R. [1970-1974l] Doc. 5/145, Allemagne (République Fédérale d').
- CRAWFORD, A.B. et JAKES, W.C. [1952] Selective fading of microwaves. *B.S.T.J.*, 68-90.
- FEHLHABER, L. [février 1971a] Intermodulationsgeräusche im FM-FDM-Richtfunk auf Funkfeldern mit direkter Sicht als Folge von Interferenzschwund (Bruit d'intermodulation dans les faisceaux hertziens MF-MRF sur des trajets en visibilité directe, provoqué par des évanouissements dus à des interférences de phase). Tech. Ber. des Forschungsinstituts des FTZ, A 455 TBr 29.
- FEHLHABER, L. [juin 1971b] Variations de niveau dans la bande de base sur les faisceaux hertziens à répartition en fréquence et modulation de fréquence, en visibilité directe, dues aux évanouissements d'interférence (en allemand). Tech. Ber. A 455 TBr 31, des FTZ.
- FEHLHABER, L. [février 1973] Breitband-Ausbreitungsmessungen auf einem 138 km langen Funkfeld bei 6 GHz (Mesures de propagation à large bande sur un trajet radioélectrique de 138 km de long à 6 GHz). Tech. Ber. des Forschungsinstituts des FTZ, A 455 TBr 40.
- FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [avril 1965] Contribution à l'explication des phénomènes d'évanouissement sur des liaisons radioélectriques en visibilité directe dans les bandes des ondes décimétriques et centimétriques (en allemand). Tech. Ber. Nr. 5578 des Fernmeldetechnischen Zentralamtes (Deutsche Bundespost).
- GIUGLIARELLI, G. [avril 1965] Influence de la propagation maritime sur la transmission des signaux de télévision en couleur. *Revue de l'U.E.R.*, 90-A, Technique.
- HARROLD, T.W. [1967] Attenuation of 8.6 mm-wavelength radiation in rain. *Proc. I.E.E.*, 114, 201.
- HICKIN, E.M. [septembre-octobre 1968] 18 GHz Propagation. I.E.E. Conference on Tropospheric Wave Propagation, Londres.
- HOGG, D.C. Millimetre Wave Communication through the Atmosphere. *Science*, Vol. 159, 3810, 39-46.
- IKEGAMI, F., AKIYAMA, T., AOYAGI, S. et YOSHIDA, H. [mars 1968] Variation of radio refraction in the lower atmosphere. *IEEE Trans.*, Vol. AP-16, 3.

- KALININ, A.I. [1964] *Calcul des faisceaux hertziens* (en russe), Sviaz.
- KAYLOR, R.L. [septembre 1953] A statistical study of selective fadings of S.W.F. radio signals. *B.S.T.J.*
- KINASE, A. et autres [1967a] Oversea propagation statistics of the UHF band within-the-horizon and VHF band beyond-the-horizon. *NHK Tech. Jour.*, 19, 7.
- KINASE, A. et autres [1967b] Statistical characteristics of field strength variation on the UHF and VHF bands. *NHK Tech. Jour.*, 19, 4.
- KINASE, A. et ITO, S. [1969] UHF space diversity statistics on a long line-of-sight oversea path diversity efficiency. *NHK Tech. Jour.*, 21, 2.
- LANE, J.A. [1968] Scintillation and absorption fading on line-of-sight links at 35 and 100 GHz. I.E.E. Conference Publication No. 48, *Tropospheric wave propagation*, I.E.E., Londres, 166.
- LÉFRANÇOIS, G., MARTIN, L. et ROORYCK, M. [juillet-août 1973] Influence de la propagation sur la valeur de découplage de deux polarisations orthogonales. *Ann. des télécomm.*
- LEWIN, L. [1962] Diversity reception and automatic phase correction. *Proc. I.E.E.*, 109B, 295-304.
- LLEWELLYN-JONES, D.T. et ZAVODY, A.M. [1972] Microwave attenuation due to rain at 110 GHz in South-East England. *Elec. Letters*, 8, 97.
- MAKINO, H. et MORITA, K. [janvier-février 1965] The space diversity reception and transmission systems for line-of-sight microwave links. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon.
- MAKINO, H. et MORITA, K. [août 1967] Design of space diversity receiving and transmitting systems for line-of-sight microwave links. *IEEE Trans.*, CT-15, 4, 603-614.
- MCGAVIN, R.E. et autres. [décembre 1968] Microwave diversity over irregular terrain. ESSA Technical Memorandum ERLTM-WPL 3.
- MEADOWS, R.W. et autres [1966] Measurement of multipath propagation over a line-of-sight radio link at 4 GHz using frequency-sweep technique. *Proc. I.E.E.*, 113, 1, 41.
- MORITA, K. [novembre-décembre 1970] Prediction of Rayleigh fading occurrence probability of line-of-sight microwave links. *Rev. Elect. Comm. Lab., NTT*, Japon, Vol. 18, 11-12.
- MORITA, K. [mai-juin 1971] Fluctuation of cross polarization discrimination ratio due to fading. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 19, 5-6.
- MORITA, K. [juillet-août 1972] Prediction of equivalent Rayleigh fading occurrence rate on line-of-sight reflected wave path. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 20.
- MORITA, K. et KAKITA, K. [1958] Fading in microwave relays. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, 6, 9, 352-357.
- NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note No. 101, Revised, Boulder, Colorado, Etats-Unis d'Amérique.
- NOMURA et autres [1967] Distortion due to fading in high-capacity FDM-FM transmission. *Electronic and Electrical Communications in Japan*, Vol. 50, 6.
- NORTON, K.A., HUFFORD, G.A., DOUGHERTY, H.T. et WILKERSON, R.E. [1965] Diversity design for within-the-horizon radio-relay systems. NBS, Report 8787.
- RUE, O. [décembre 1971] Intermodulation distortion owing to multipath propagation over FM/FDM microwave links. *Proc. I.E.E.*, Vol. 118, N° 12.
- SHARPLESS, W.M. [novembre 1946] Measurements of the angle of arrival of microwaves. *Proc. IRE*, Vol. 34, 837-845.
- SHIMBA, M. et MORITA, K. [1972] Radio propagation characteristics due to rainfall at 19 GHz, International IEEE/G-AP Symposium, 246-249.
- SKERJANEC, R.E. et autres [octobre 1968] Space and frequency diversity measurements on a line-of-sight path in Ohio. ESSA Technical Memorandum ERLTM-ITS 145.
- SMITH-ROSE, R.L. et STICKLAND, A.C. [1946] An experimental study of the effect of meteorological conditions upon the propagation of centimetre radio waves. Meteorological factors in radio wave propagation, published by the Physical Society.
- TAKADA, M. et autres [juillet-août 1968] SF-F2 short-haul radio-relay system in the 15 GHz. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, 16, 613-641.
- TURNER, D. et autres [1966] Experimental investigation into radio propagation at 11.0-11.5 GHz. *Proc. I.E.E.*, 113, 9, 1477.
- UGAI, S. et KANEDA, Y. [mai-juin 1963] Statistical evaluation of microwave attenuation due to rain cells. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 11, 5-6.
- WEIBEL, G.E. et DRESSEL, H.O. [1967] Propagation studies in millimetre-wave link systems. *Proc. IEEE*, 55, 497.
- YAMAMOTO, H., MORITA, K. et NAKAMURA, Y. [1973] Experimental considerations on 20 GHz high-speed digital radio relay systems. IEEE International Conf. on Communications, 28-37-42.

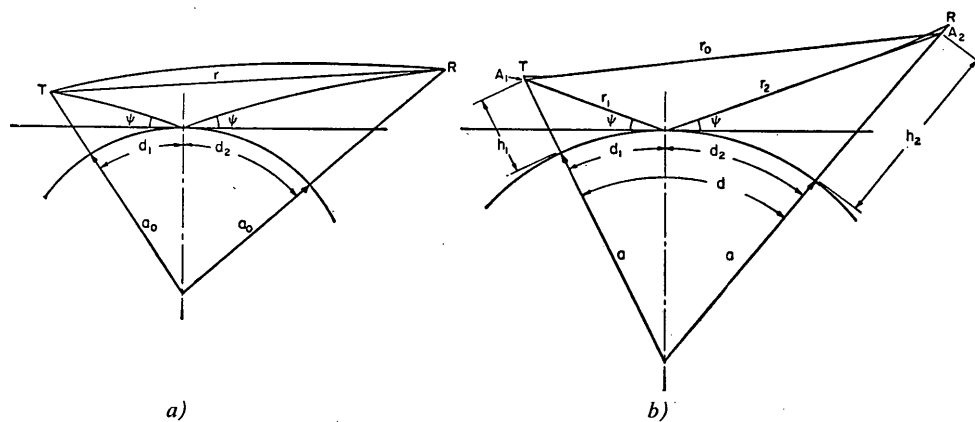


FIGURE 1

Relations géométriques pour les trajets de propagation en deçà de l'horizon

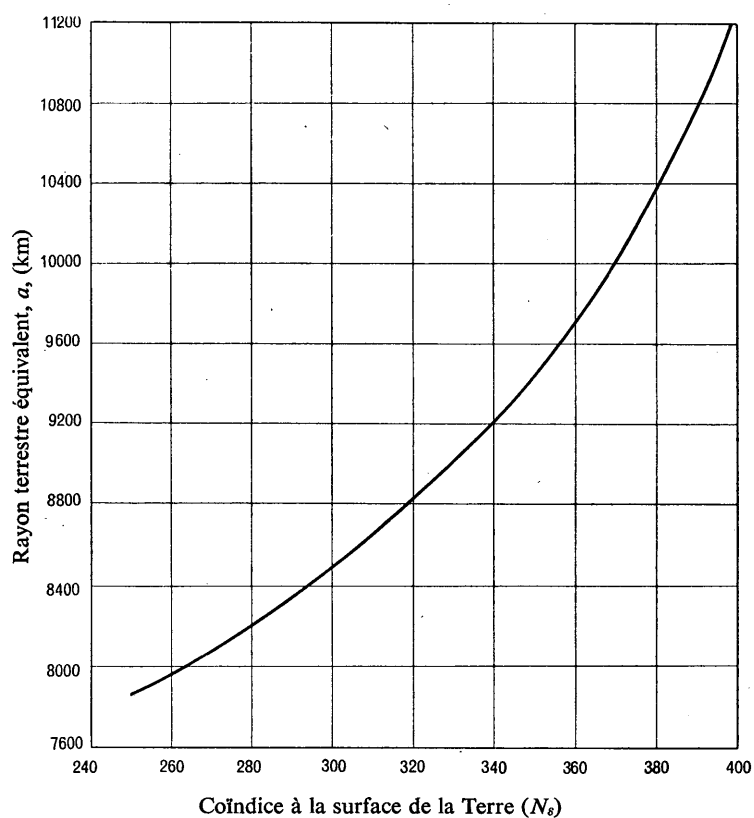


FIGURE 2

Variation du rayon terrestre équivalent, a , en fonction de N_s

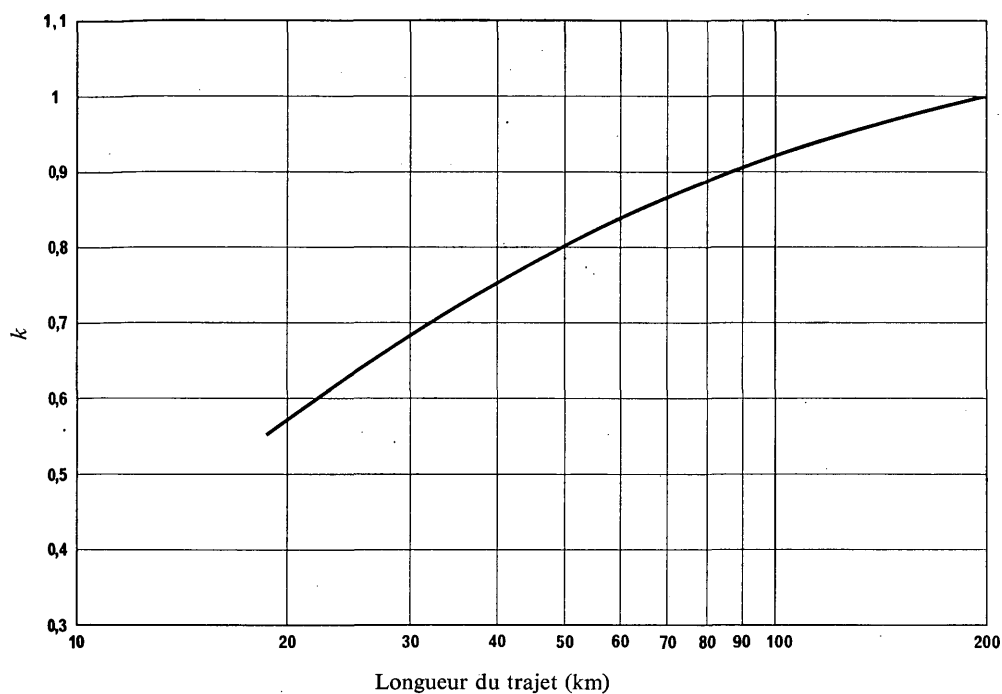
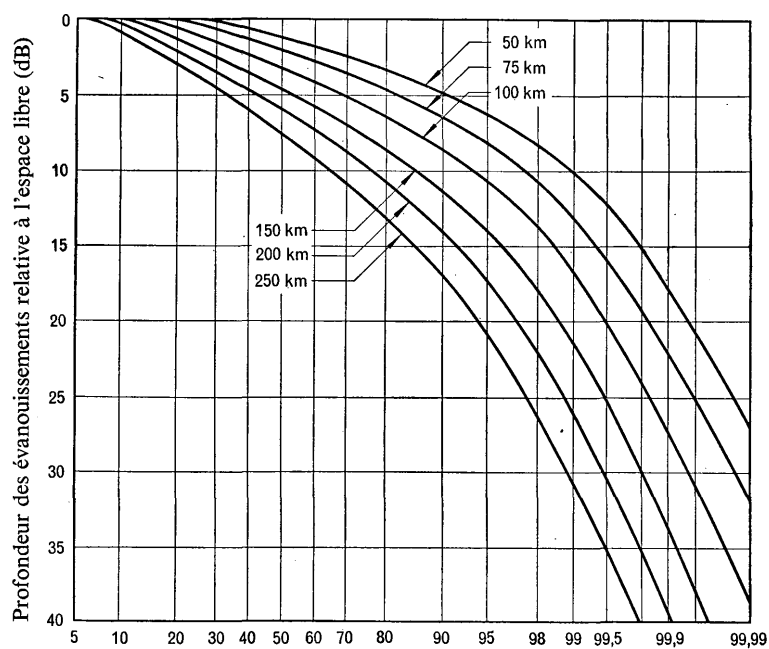


FIGURE 3

Valeur minimale de k dépassée durant approximativement 99,9% du temps
(Climat tempéré continental)



Pourcentage de temps pendant lequel la profondeur des évanouissements n'est pas dépassée

FIGURE 4

Courbes provisoires donnant la profondeur des évanouissements qui n'est pas dépassée pendant un pourcentage donné du mois le plus défavorable; 4 GHz; terrain vallonné moyen; nord-ouest de l'Europe

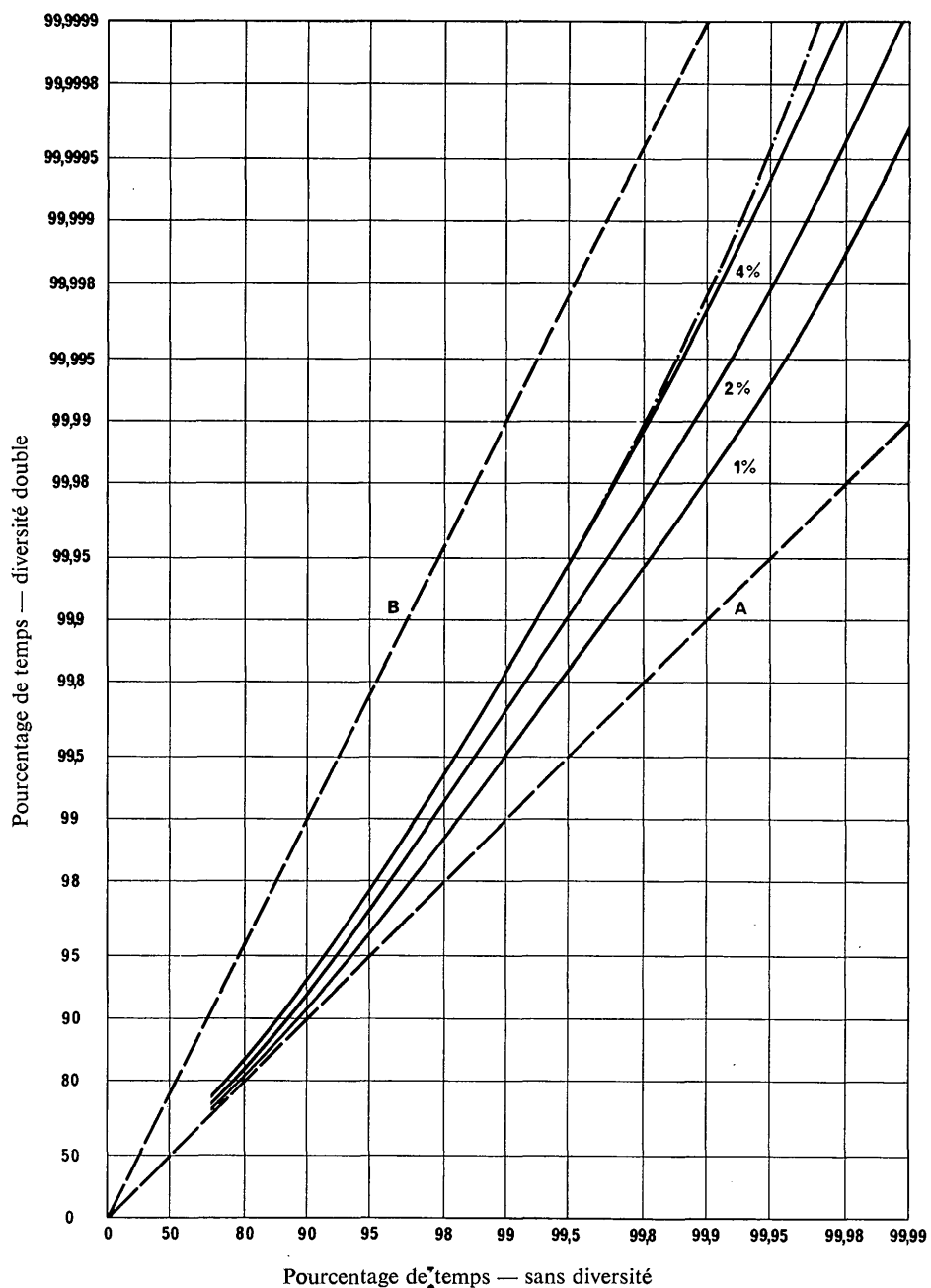


FIGURE 5

Courbe A: Courbe limite sans diversité

Courbe B: Courbe limite avec diversité double

— Diversité de fréquence avec $\Delta F/F = 1\%$, 2% et 4%

-.-.- Diversité d'espace

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5F: QUESTIONS RELATIVES AUX SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS
SPATIALES (ENTRE POINTS FIXES ET POUR LA RECHERCHE SPATIALE)

AVIS ET RAPPORTS

Avis

Il n'y a pas d'Avis dans cette section

Rapports

RAPPORT 426-1 *

**MÉTHODES DE PRÉVISION DU BRUIT RADIOÉLECTRIQUE,
DE L'ABSORPTION ET DE LA RÉFRACTION DES ONDES
DANS LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE**

Rassemblement de données

(1970 – 1974)

Le Programme d'études 5C-2/5 demande que l'on mette au point des méthodes de prévision du bruit radioélectrique ainsi que de l'absorption et de la réfraction des ondes radioélectriques, en relation avec les systèmes de télécommunication spatiale.

Le Rapport 564 contient une réponse provisoire à cette demande mais il est bien évident que l'on devra continuer à recueillir des résultats de mesure si l'on veut améliorer la précision et étendre le champ d'application de cette méthode de prévision.

En conséquence, les administrations sont instamment priées d'entreprendre des mesures radioélectriques de longue durée, notamment sur les fréquences supérieures à 10 GHz, et, si possible, des mesures correspondantes des taux de précipitation. Les mesures radioélectriques peuvent être soit des mesures directes dans lesquelles la source de signaux serait le soleil ou une radiobalise à satellite, soit des mesures indirectes du bruit d'origine céleste. On a des raisons de penser que les radiomètres constituent un moyen simple et suffisamment précis pour obtenir des données statistiques sur l'affaiblissement le long de trajets obliques. Autant que possible, les mesures pluviométriques devraient indiquer comment le taux de précipitation total se subdivise selon les divers types de pluie, par exemple le type à convection et le type à stratification.

Par ailleurs, les administrations sont priées de communiquer leurs résultats de mesure au Directeur du C.C.I.R. qui, au moment opportun, assurera la publication de toutes les données recueillies.

L'utilité des diverses contributions se trouverait grandement accrue si les administrations voulaient bien présenter leurs résultats de mesure en les récapitulant comme indiqué dans le Tableau A ci-joint.

Il conviendrait également de fournir des renseignements sur les points suivants:

- amélioration à attendre des techniques de diversité d'espace;
- corrélation entre l'affaiblissement et le bruit.

* Adopté à l'unanimité.

TABLEAU A

1. Pays
2. Emplacement géographique de la station terrienne de mesure { latitude
longitude
3. Source des signaux radioélectriques ⁽¹⁾
4. Angle de site de la source de signaux (gamme) ⁽²⁾ ° à °
5. Fréquence des signaux radioélectriques GHz
6. Type de l'antenne et de son alimentation, à la station de mesure
7. L'antenne est-elle protégée par un radôme? (oui ou non)
8. Ouverture du faisceau d'antenne aux points à -3 dB.....
9. Durée totale de la période de mesure: de (jour, mois, année)
à (jour, mois, année)
10. Nombre total d'heures entières de mesure
11. Indiquer si les statistiques pluviométriques associées correspondent:
 - à un seul emplacement (oui ou non) ou
 - à un trajet de longueur finie (oui ou non).....
et donner la longueur de ce trajet km
12. Type de pluviomètre (ou autre appareil de mesure de la pluie) utilisé
13. Temps d'intégration du ou des pluviomètres utilisés secondes

A1

		(X) Affaiblissement (dB) supérieur à l'affaiblissement en espace libre, et (Y) Taux de précipitation (mm/h) dépassé pendant les pourcentages de temps suivants								
Période totale	{ X Y	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01	0,001
Mois au cours duquel la valeur a été maximale	X									
	Y									

A2

		(X) Bruit (K) dépassé pendant les pourcentages de temps suivants, et (Y) Taux de précipitation (mm/h) dépassé pendant les pourcentages de temps suivants								
Période totale	{ X Y	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01	0,001
Mois au cours duquel la valeur a été maximale	{ X Y									

⁽¹⁾ Par exemple, le Soleil, des radiobalises à satellite, un bruit d'émission, etc.

⁽²⁾ Il est suggéré que les valeurs mesurées du bruit soient classées en plusieurs gammes d'angles de site: < 5°, 5-15°, 15-30°, 30-60°, 60-90°.

A3

	Réfraction (degrés d'arc) dépassée pendant les pourcentages de temps suivants								
	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01	0,001
Période totale									

RAPPORT 564 *

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE

(Programme d'études 5C-2/5)

(1974)

1. Introduction

Pour réaliser les liaisons Terre-espace dans les systèmes de télécommunication spatiale, il faut tenir compte d'un certain nombre de phénomènes qui se produisent dans la troposphère. Un affaiblissement peut être dû à l'absorption par les gaz atmosphériques ainsi qu'à l'absorption et à la diffusion par les hydrométéores (précipitations, nuages, etc.). Ces effets peuvent être dominants et particulièrement importants aux fréquences supérieures à 10 GHz environ. L'affaiblissement des signaux peut également résulter d'une divergence du faisceau de l'antenne de la station terrienne due à la réfraction normale dans l'atmosphère et d'une distorsion de phase dans l'ouverture de l'antenne due à de brusques fluctuations. En outre, les scintillations d'amplitude, de phase et d'angle peuvent entraîner des fluctuations de l'intensité du signal et de l'angle d'arrivée. Ces effets diminuent lorsque l'angle de site augmente et ne peuvent guère être très importants aux angles de site supérieurs à 3° environ. De grandes scintillations d'amplitude causées par de fortes variations de l'indice de réfraction peuvent persister à des angles de site légèrement plus grands.

Ces différents effets sont étudiés, d'un point de vue phénoménologique, dans d'autres rapports du C.C.I.R. et notamment dans les Rapports 233-3, 234-3 et 563. Le présent Rapport est consacré aux aspects des phénomènes de la propagation qui peuvent avoir un intérêt direct et immédiat pour les constructeurs de systèmes de télécommunication spatiale.

2. Effets de la réfraction normale

Du fait des variations normales de l'indice de réfraction avec l'altitude, les signaux qui se propagent dans l'atmosphère changent de direction, ce qui donne lieu à des écarts de pointage de l'antenne. Ces écarts sont particulièrement importants pour les systèmes de télécommunication fonctionnant sous de petits angles de site.

Il se produit en outre un affaiblissement du signal dû à la divergence ou défocalisation du faisceau de l'antenne. On a calculé la valeur de cet affaiblissement [Yokoi et autres, 1970; Crane, 1971] ainsi que ces fluctuations par rapport à la valeur moyenne [Crane, 1971]. L'affaiblissement dû à la défocalisation est indépendant de la fréquence et est inférieur à 0,4 dB pour un angle de site de 3° même pour les très grandes valeurs de l'indice de réfractivité du sol. Comparativement aux effets de l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques et aux précipitations, il ne peut donc avoir beaucoup d'importance pour la réalisation des systèmes de télécommunication spatiale.

* Adopté à l'unanimité; l'attention des Commissions d'études 4 et 11 doit être attirée sur le présent Rapport.

3. Incohérence du front de l'onde

Il peut également se produire une réduction du gain de l'antenne et, par conséquent, une diminution du niveau des signaux, due à une distorsion de phase du front de l'onde dans l'ouverture d'une antenne de grandes dimensions, ceci étant dû aux variations de l'indice de réfraction liées aux turbulences. Cet effet, qui est étudié dans le Rapport 234-3, diminue lorsque l'angle de site augmente, et augmente avec la fréquence.

Des mesures de l'affaiblissement des signaux dû à ce phénomène ont été faites au Japon sur 4 et 6 GHz [Crane, 1971]. Pour un angle de site de 5°, on a constaté que l'affaiblissement du signal était de l'ordre de 0,2 dB à 4 GHz et un peu plus grand à 6 GHz. Les mesures faites sur des fréquences plus élevées ont été moins concluantes.

4. Scintillations et évanouissements

Les effets des scintillations d'amplitude de phase et d'angle, sur des trajets Terre-espace, sont étudiés dans les Rapports 234-3 et 263-3. Comme il est indiqué dans ces Rapports, les scintillations troposphériques ne peuvent guère avoir d'importance pour la réalisation des systèmes de télécommunication spatiale fonctionnant sous de grands angles de site et à des fréquences inférieures à 20 GHz environ, mais peuvent en avoir à des fréquences inférieures à 6 GHz. Les scintillations troposphériques peuvent avoir de l'importance sous de petits angles de site tels que ceux qui sont nécessaires pour transmettre des communications aux latitudes élevées à l'aide de satellites géostationnaires ou, dans certains cas, aux basses latitudes pour éviter un trajet à deux bonds.

Les résultats des mesures faites au Canada sur 7 GHz [C.C.I.R., 1970-1974a] indiquent que, pour un climat continental tempéré, la profondeur d'évanouissement pour un angle de site de 5° a dépassé 4 dB et 2,5 dB pendant 0,1 % et 1 % du temps respectivement, en été. On a constaté que la marge d'évanouissement requise augmentait rapidement lorsque l'angle de site diminuait et, pour des angles de site inférieurs à 3°, une profondeur d'évanouissement supérieure à 8 dB a été dépassée pendant 1 % du temps. En hiver ou pour un climat polaire, la profondeur d'évanouissement considérée pour les mêmes pourcentages de temps et les mêmes angles de site a été beaucoup moins grande.

Des mesures de la scintillation pour de petits angles ont été également effectuées au Japon [Yokoi et autres, 1970]. Contrairement à ce qui avait été observé précédemment, les résultats de ces mesures faites à 4 et 6 GHz n'ont pas fait apparaître de corrélation avec la fréquence.

Les effets des évanouissements aux petits angles sont particulièrement importants pour les constructeurs de répondeurs destinés à des stations spatiales à accès multiple utilisables par un certain nombre de stations terriennes, en raison du problème posé par la compensation de puissance sur le trajet ascendant.

Les fluctuations de l'indice de réfraction entraînent également des variations de la position apparente d'une station spatiale observée d'une station terrienne. Il est toutefois peu probable que ces effets puissent avoir de l'importance sauf pour des systèmes d'antennes à faisceaux très étroits sans poursuite fonctionnant sous de très petits angles de site, inférieurs à 2° environ.

5. Absorption due aux gaz atmosphériques

L'absorption due aux gaz atmosphériques est étudiée dans le Rapport 234-3 qui indique l'affaiblissement pour des trajets verticaux ou horizontaux à travers l'atmosphère, pour une gamme de fréquences allant de 1 à 160 GHz et pour un climat modérément humide (7,5 g/m³ de vapeur d'eau à la surface de la Terre). Il indique également les limites correspondant à des taux d'humidité relative de 0 % et de 100 %. L'affaiblissement peut être calculé pour tout autre angle de site supérieur à 5° environ en multipliant l'affaiblissement sur un trajet vertical par la cosécante de l'angle de site.

Aux Etats-Unis d'Amérique [Bean et Dutton, 1966], les valeurs extrêmes de l'humidité absolue vont de 0,1 g/m³, valeur qui est dépassée pendant 99,0 % du temps en février, à 26,0 g/m³, valeur qui est dépassée pendant 1,0 % du temps au mois d'août.

6. Affaiblissement dû aux précipitations

6.1 Résultats des mesures

La plupart des mesures à longue échéance de l'affaiblissement dû aux précipitations ont été faites sur des trajets de Terre en visibilité directe mais l'on dispose des résultats de plusieurs études portant sur des mesures directes et indirectes de l'affaiblissement sur des trajets obliques.

Des mesures directes de l'affaiblissement sur des trajets Terre-espace ont été faites au Japon [C.C.I.R., 1966–1969; Kinase et Kimpara, 1969] sur les fréquences de 9,4, 11,8 et 17,0 GHz en utilisant des radiomètres solaires. Pour une période d'un an, on a constaté que l'affaiblissement dépassait 4,5, 7 et 14 dB respectivement sur les trois fréquences pendant 0,01 % de l'année lorsque toutes les mesures ont été réduites pour un angle de site de 45°. En utilisant les données de quatre années de mesures à 9,4 GHz, on a constaté que les résultats statistiques présentaient des variations très importantes d'une année à l'autre pour les pourcentages de temps inférieurs à 0,1 % environ. Cela provient du fait que les valeurs statistiques relatives à un faible pourcentage de temps dépendent de l'occurrence d'un petit nombre d'orages violents, ce qui est le cas dans de nombreuses régions du globe. D'autres mesures d'affaiblissement ont été effectuées à Yamaguchi (Japon) sur la fréquence 4 GHz, par l'observation de la dégradation du rapport porteuse/température de bruit sur un circuit opérationnel de télécommunication par satellite [Yokoi et autres, 1973]. On a constaté que sur une période d'un an, pour un angle de site de 8°, l'affaiblissement avait pour valeurs 0,6, 0,9 et 1,3 dB respectivement pendant 0,1, 0,01 et 0,001 % du temps. En outre, on a déterminé, à ce même angle de site, la distance équivalente à travers des précipitations de diverses intensités. On a trouvé comme valeurs représentatives de la distance équivalente 45, 23, 16 et 10 km pour des intensités de précipitation respectivement de 10, 30, 50 et 100 mm/h.

Des mesures d'affaiblissement ont été faites pendant une période de trois ans près de Washington, D.C. à la fréquence 15,3 GHz sous un angle de site de 38° en utilisant le satellite ATS-5 [Craft, 1971]; elles étaient complétées par des mesures radiométriques. L'affaiblissement dépassait 1,5, 6 et 10 dB respectivement pendant 1,0, 0,1 et 0,05 % du temps. Des mesures de l'affaiblissement faites pendant un an à 16 GHz en utilisant un radiomètre de poursuite du Soleil situé dans le New Jersey, aux Etats-Unis d'Amérique, ont montré qu'un affaiblissement de 3, 10 et 20 dB était dépassé pendant 0,14, 0,03 et 0,01 % du temps respectivement [Wilson et Mammel, 1973].

Un grand nombre de mesures de l'affaiblissement dû aux précipitations ont également été faites au Royaume-Uni d'après des observations du bruit solaire [Davies, 1973] ainsi que des mesures de la température du bruit du ciel [Turner et autres, 1970]. Des statistiques de l'affaiblissement ont été établies aux fréquences de 12, 19 et 37 GHz, pour lesquelles on a observé des affaiblissements d'environ 3, 5 et 10 dB respectivement pendant 0,1 % du temps. En ce qui concerne les mesures du bruit solaire, aucune variation systématique n'a été observée en fonction de l'angle de site. Il ressort des données recueillies pendant quatre ans à la fréquence 19 GHz que le pourcentage du temps pendant lequel l'affaiblissement dépassait 10 dB dans le mois le plus défavorisé était presque dix fois plus grand que la moyenne correspondante relative à toute cette période. Pour un pourcentage donné du temps, les valeurs extrêmes des distributions annuelles différaient d'un facteur approximativement égal à 2. Des histogrammes du nombre et de la durée des évanouissements supérieurs à 5 et 10 dB ont été aussi établis [Davies, 1973].

En Malaisie, des mesures ont été faites à 11,8 GHz en utilisant un radiomètre de poursuite du Soleil pendant la journée et la température du bruit du ciel pendant la nuit [Kinase et Kimpara, 1973]. Pendant une période d'observation d'une année, on a constaté que l'affaiblissement dépassait 7,3 dB et 14 dB pendant 0,1 % et 0,02 % du temps respectivement. Les affaiblissements importants sont généralement associés à de fortes pluies et apparaissent plus fréquemment pendant la saison des pluies, de la fin juillet à la mi-décembre, que pendant le reste de la période d'observation. Dans tous les cas, sauf un, dans lequel l'affaiblissement a dépassé 10 dB, la durée des affaiblissements était inférieure à 20 minutes et ceux qui ont été observés pendant la journée étaient caractérisés par une occurrence assez régulière pendant les heures du milieu et de la fin de l'après-midi. Des mesures de l'affaiblissement faites pendant 12 mois à la fréquence 11 GHz, au moyen d'un radiomètre de poursuite du Soleil, installé à Innisfail (Australie), ont montré que l'affaiblissement dépassait 5 et 10 dB respectivement pendant 0,07 et 0,006 % du temps [C.C.I.R., 1970–1974b]. Des mesures météorologiques effectuées en Suisse avec un équipement de radiodétection ont montré que le terrain a une influence marquée sur la formation de zones à forte réflectivité et, par conséquent, à affaiblissement élevé [C.C.I.R., 1970–1974c].

Pour les très petits pourcentages de temps correspondant à des affaiblissements importants, les phénomènes rares d'une durée de 10 et 20 minutes jouent un rôle important. Par exemple, les phénomènes en grande partie responsables des valeurs de l'affaiblissement qui apparaissent pendant 0,001 % du

temps se produisent tous les deux à quatre ans. Même en ce qui concerne les affaiblissements correspondant à 0,01 % du temps, plusieurs années de mesures peuvent être nécessaires selon la précision requise pour les résultats.

On ne dispose pas d'informations suffisantes concernant l'influence de l'angle de site sur l'affaiblissement dû aux précipitations et la majeure partie des informations limitées disponibles découlent d'études sur la corrélation spatiale du taux de précipitation faites à l'aide de radars météorologiques [C.C.I.R., 1970-1974d]. Il convient d'interpréter prudemment les résultats des mesures obtenues à l'aide d'un instrument de visée du Soleil étant donné que ces observations sont limitées aux heures de la journée pendant lesquelles l'angle de site et l'azimut varient systématiquement. L'occurrence de précipitations intenses n'est probablement pas répartie uniformément sur toute la journée.

On observe des intensités de précipitation extrêmement élevées au cœur des cellules de précipitation intense n'ayant qu'une étendue horizontale limitée. Par conséquent, sauf pour les angles quasi verticaux ou pour les pluies continues, la distance effective dépend de la dimension horizontale de ces cellules. Comme il est indiqué dans le Rapport 234-3, pour les très petits pourcentages de temps, les variations de la distribution cumulative de l'affaiblissement avec l'angle de site sont déterminées par la probabilité d'occurrence d'une cellule de précipitation sur le trajet ou, sous de petits angles de site, par la probabilité d'occurrence de plusieurs cellules.

L'affaiblissement dû aux nuages chargés de pluie ou au brouillard peut être calculé d'après le Rapport 234-3 si l'on connaît leur contenu d'eau liquide. Sauf en ce qui concerne les nuages contenant une grande quantité d'eau, l'affaiblissement total dû aux nuages n'est pas important et est en tout cas vraisemblablement incorporé dans les mesures statistiques. Les effets des nuages constitués de particules de glace, de la grêle sèche et de la neige peuvent généralement être négligés aux fréquences considérées.

Des mesures de l'affaiblissement dû aux nuages chargés de pluie ont été faites au Japon [Yokoi et autres, 1971] aux fréquences de 15,5 et 31,6 GHz, d'après des observations du bruit lunaire. On a constaté que l'affaiblissement est de 0,5 dB à 0,8 dB et de 2 dB à 3 dB respectivement pour ces deux fréquences, lorsque toutes les mesures sont réduites pour un angle de site de 20°.

6.2 Méthode de prévision

Le Rapport 563 contient des courbes de la distribution cumulative du taux de précipitation pour cinq types différents de climats pluvieux. Ces courbes ne doivent être utilisées qu'à défaut d'autres données pertinentes pour un lieu donné. Ces courbes correspondent aux valeurs moyennes pour les régions considérées et l'on peut prévoir des écarts importants entre différents lieux se trouvant dans une même région et pour un lieu donné d'une année à l'autre. En utilisant les Fig. 3a ou 3b du Rapport 233-3 pour convertir le taux de précipitation en mm/h en affaiblissement spécifique en dB/km, on peut utiliser ces données pour évaluer l'affaiblissement qui pourrait être dépassé pendant différents pourcentages de temps dans les différentes conditions climatiques, à condition que l'on connaisse également la longueur du trajet traversant les précipitations. Une relation entre la distance effective et l'angle de site qui s'applique à 0,01 % du temps est proposée sur la Fig. 1, compte tenu des mesures de la température du bruit faites au Royaume-Uni [Turner et autres, 1970] et des mesures de l'affaiblissement [Kinase et Kimpara, 1969] et de la corrélation spatiale du taux de précipitation [C.C.I.R., 1970-1974d] faites au Japon.

Par conséquent, pour un lieu et un angle de site donnés, on peut déterminer de la façon indiquée ci-après l'affaiblissement qui pourrait être dépassé pendant 0,01 % du temps dont la moyenne est calculée pour un certain nombre d'années. Si l'on ne dispose pas d'autres données ou si on ne peut pas les calculer, on peut obtenir l'intensité de précipitation en surface par minute d'horloge d'après la Fig. 11 du Rapport 563 correspondant au climat pluvieux indiqué sur la Fig. 12 de ce même Rapport. On détermine alors l'affaiblissement spécifique, en dB/km, correspondant à ce taux de précipitation d'après les Fig. 3a et 3b du Rapport 233-3. La valeur obtenue est à son tour multipliée par la distance effective indiquée sur la Fig. 1 du présent Rapport pour déterminer l'affaiblissement prévu.

Pour certaines régions (par exemple, le Japon), les résultats fournis par cette procédure concordent assez bien avec les quelques statistiques disponibles. Pour la Malaisie [Kinase et Kimpara, 1973], toutefois, elle donne une valeur sous-estimée de l'affaiblissement pendant 0,01 % du temps; en revanche, pour le Royaume-Uni, elle en donne des valeurs sensiblement surestimées. On a un besoin urgent de disposer d'un plus grand nombre de données mesurées, en particulier sur l'influence d'une variation de l'angle de site. On a suggéré qu'on pourrait améliorer la procédure de prévision en modifiant les courbes de précipitation figurant dans le Rapport 563 au moyen du rapport du nombre de jours d'orage au nombre total de jours de pluie en un lieu donné. On a proposé aussi plusieurs courbes de distance équivalente, dont chacune s'applique à une intensité de précipitation particulière [C.C.I.R., 1970-1974e]. Cette solution mériterait une étude plus approfondie.

6.3 *Emploi de la diversité de site*

L'occurrence des valeurs les plus élevées de l'affaiblissement pendant des précipitations étant généralement due à des cellules de précipitation intense d'étendue horizontale limitée, on peut utiliser avantageusement la diversité de trajet ou de site lorsqu'on construit des stations terriennes. Des mesures ont été faites dans le New Jersey (Etats-Unis d'Amérique) à la fréquence 16 GHz, de janvier à décembre 1970, en utilisant trois radiomètres espacés de 11, 19 et 30 km [Wilson et Mammel, 1973]. Chacun d'eux était pointé sous un angle de site de 32° et normal à la ligne joignant les antennes. On a observé un affaiblissement de 10 dB sur chacun des trois trajets pendant approximativement 0,07 % du temps. Le même affaiblissement est apparu simultanément pour les radiomètres espacés de 11 km pendant 0,004 % du temps, pour les radiomètres espacés de 19 km pendant 0,003 % du temps. Le plus grand espacement donnait lieu au plus faible taux d'apparition simultanée de l'affaiblissement de 10 dB. Au niveau de 6 dB, les stations prises individuellement notaient cet affaiblissement pendant environ 0,1 % du temps. Le même affaiblissement se présentait simultanément pour les radiomètres espacés de 11 km pendant 0,01 % du temps; il se présentait pour l'espacement de 19 km pendant 0,008 % du temps, et pour l'espacement de 30 km pendant 0,004 % du temps. A ce même niveau de 6 dB, l'affaiblissement s'est produit simultanément sur les trois radiomètres pendant moins de 0,001 % du temps.

7. **Température de bruit**

La relation entre la température de bruit du ciel pour un milieu d'absorption donné et l'affaiblissement est indiquée dans le Rapport 234-3. Lorsque l'affaiblissement augmente, la température de bruit du ciel augmente et atteint une valeur maximale déterminée essentiellement par la température cinétique de régions fortement absorbantes au voisinage de l'antenne, c'est-à-dire ayant une température d'environ 280 K. La distribution cumulative de la température de bruit du ciel peut alors être évaluée de la même façon que celle qui est indiquée pour l'affaiblissement dans le précédent § 6.2.

Des mesures de la température de bruit du ciel ont été faites au Royaume-Uni [Turner et autres, 1970] aux fréquences de 4, 12 et 17 GHz sous des angles de site de 5° et de 20°. On a constaté que, pendant 0,01 % du temps, la température de bruit du ciel pour un angle de site de 20° dépassait 148 K et 223 K respectivement aux fréquences de 12 et 17 GHz. Pour un angle de site de 5°, les valeurs correspondantes ont été d'environ 260 K et 274 K.

Pour les affaiblissements ne dépassant pas la valeur de 10 dB et à une fréquence de 15 GHz, on a constaté que les radiomètres offraient un moyen simple et précis d'obtenir des statistiques sur l'affaiblissement dû aux précipitations [C.C.I.R., 1970-1974f].

8. **Considérations relatives aux brouillages**

8.1 *Brouillage causé aux stations spatiales et par ces dernières*

Le présent Rapport ne concerne que le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales ou entre stations terriennes faisant partie d'un système spatial et des stations spatiales faisant partie d'un autre système. Les aspects de la propagation qui sont liés aux problèmes de brouillages entre stations terriennes et stations de Terre sont étudiés dans le Rapport 569.

Lorsqu'on étudie le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales, les petites valeurs de l'affaiblissement qui ne sont pas dépassées pendant de petits pourcentages de temps prennent de l'importance. Pour toutes les utilisations pratiques, on peut admettre que l'affaiblissement dû à l'oxygène est indépendant de l'heure et du climat. La densité de la vapeur d'eau est toutefois variable. Pour la plupart des climats, il semble que, pendant le mois le moins humide de l'année, la densité de vapeur d'eau à la surface de la Terre est inférieure à 2 g/m³ environ pendant 20 % du temps et est négligeable pendant 0,01 % du temps [Bean et Dutton, 1966].

La Fig. 2 indique les valeurs au-dessous desquelles on peut prévoir que l'affaiblissement dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau tombera pendant 20 % et pendant 0,01 % du mois le moins humide aux fréquences de 4, 11, 18 et 30 GHz et elle a été établie en tenant compte des effets de la défocalisation du faisceau. En ce qui concerne les courbes pour 0,01 % du temps, elles ont été établies sans tenir compte des effets de la scintillation (voir le Rapport 569, § 6.2); elles ne devraient pas être utilisées pour des fréquences inférieures à 20 GHz lorsqu'il est question d'angles de site plus petits que 5° environ.

Pour ce calcul, l'affaiblissement du signal dû à la défocalisation correspond à un climat continental polaire et s'élève à 1 dB pour un angle de site nul, cette valeur diminuant lorsque l'angle de site augmente.

8.2 Protection de l'orbite géostationnaire

Les effets de la réfraction sur la protection de l'orbite géostationnaire sont étudiés dans le Rapport 393-2.

9. Restrictions imposées pour la largeur de bande utilisée dans les systèmes de télécommunication spatiale

Au voisinage des raies d'absorption dues aux gaz atmosphériques, une dispersion anormale entraîne de petites variations de l'indice de réfraction. Ces variations sont toutefois peu importantes dans les bandes attribuées pour les communications Terre-espace et elles ne limiteront pas la largeur de bande des systèmes.

La diffusion multiple dans les précipitations peut limiter la largeur de bande des systèmes de transmission incohérents du fait des variations du temps de propagation des signaux subissant une diffusion multiple, mais il a été indiqué [Crane, 1971] que, dans ce cas, l'affaiblissement posera un problème beaucoup plus grave. Une étude du problème des restrictions imposées pour la largeur de bande du fait que l'affaiblissement dépend de la fréquence et en raison du décalage de phase dû aux précipitations sur les systèmes de transmission cohérents a montré que ces restrictions de largeurs de bande dépassent 3,5 GHz pour tous les cas qui peuvent se rencontrer [Crane, 1967]. Ces largeurs de bande sont plus grandes que toutes celles qui ont été attribuées pour les communications Terre-espace au-dessous de 40 GHz et l'affaiblissement dû aux précipitations aura donc beaucoup plus d'importance que le fait qu'il dépend de la fréquence.

10. Couplage de polarisations orthogonales par une précipitation

Une expérience effectuée en Suisse [C.C.I.R., 1970-1974g], avec polarisation circulaire à la fréquence 13 GHz sur un trajet de 10 km, sous un angle de site de 14°, a fait apparaître une très bonne corrélation entre l'affaiblissement des signaux de même polarisation et le couplage des polarisations croisées pendant des précipitations de taux élevé. Ces valeurs mesurées tendent à confirmer la validité d'une relation théorique calculée pour des valeurs particulières de ses coefficients [Watson et Arbabi, 1973].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEAN, B.R. et DUTTON, E.J. [1966] Radio meteorology. NBS Monograph No. 92, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- C.C.I.R. [1966-1969] Doc. V/126, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974a] Doc. 5/72, Canada.
- C.C.I.R. [1970-1974b] Doc. 5/187, Australie.
- C.C.I.R. [1970-1974c] Doc. 5/191, Suisse.
- C.C.I.R. [1970-1974d] Doc. 5/40, Japon.
- C.C.I.R. [1970-1974e] Doc. 5/154, Royaume-Uni.
- C.C.I.R. [1970-1974f] Doc. 5/73, Canada.
- C.C.I.R. [1970-1974g] Doc. 5/194, Suisse.
- CRAFT, H.D. [1971] Attenuation statistics at 15,3 GHz for Clarksburg, Md. *COMSAT Technical Review*, numéro d'automne.
- CRANE, R.K. [1967] Coherent pulse transmission through rain. *Trans. IEEE*, AP-15, 252-256.
- CRANE, R.K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands. *Proc. IEEE*, 59, 173-188.
- DAVIES, P.G. [1973] Radiometer measurements of atmospheric attenuation at 19 and 37 GHz along Sun-Earth paths. *Proc. I.E.E.*, 120, 159-164.
- KINASE, A. et KIMPARA, E. [août 1969] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 10 GHz band at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Ser. N° 130.
- KINASE, A. et KIMPARA, E. [octobre 1973] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz band at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Ser. N° 171.
- TURNER, D., JARVIS, E.G. et HINCHCLIFFE, R.V. [1970] Aerial noise temperature measurements at 3,95, 11,75 and 17 GHz. *Proc. Conf. on Earth Station Technology. I.E.E. Conf. Publ.* No. 72, Londres.

- WATSON, P.A. et ARBABI, M. [avril 1973] Rainfall cross-polarization at microwave frequencies, *Proc. I.E.E.*, 120, 4, 413-418.
- WILSON, R.W. et MAMMEL, W.L. [avril 1973] Results from a three-radiometer path-diversity experiment. Proc. Conference on Propagation of Radio Waves at Frequencies above 10 GHz. I.E.E. Conference Publication No. 98.
- YOKOI, H., SATOH, T., YAMADA, M. et AKAGAWA, M. [1971] Propagation test using astronomical radio sources at 15,5 and 31,6 GHz. Int. Symposium on Antennae and Propagation, Japon.
- YOKOI, H., YAMADA, M. et OGAWA, A. [octobre 1973] Measurement of precipitation attenuation for satellite communication in low elevation angles. IUCRM, Nice, France.
- YOKOI, H., YAMADA, M. et SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. *Publ. Astronom. Soc.*, Japon, 22, 511-524.

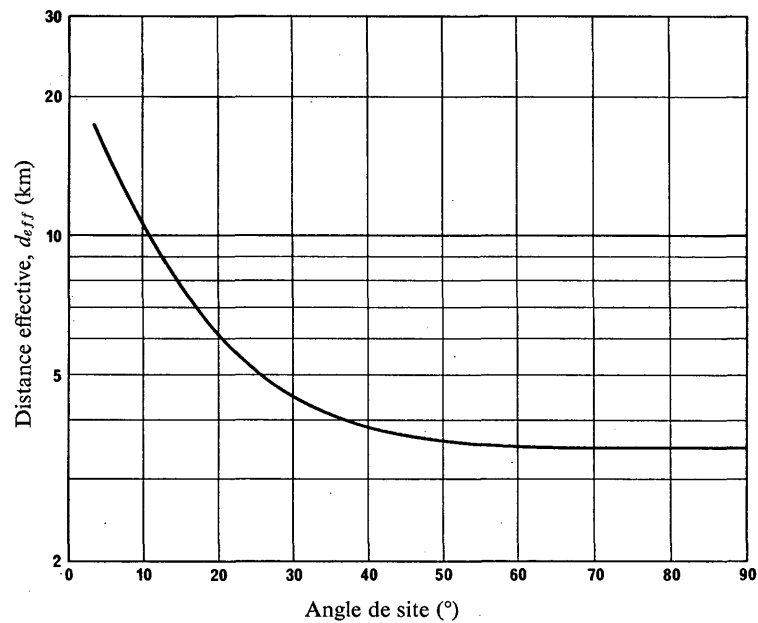


FIGURE 1

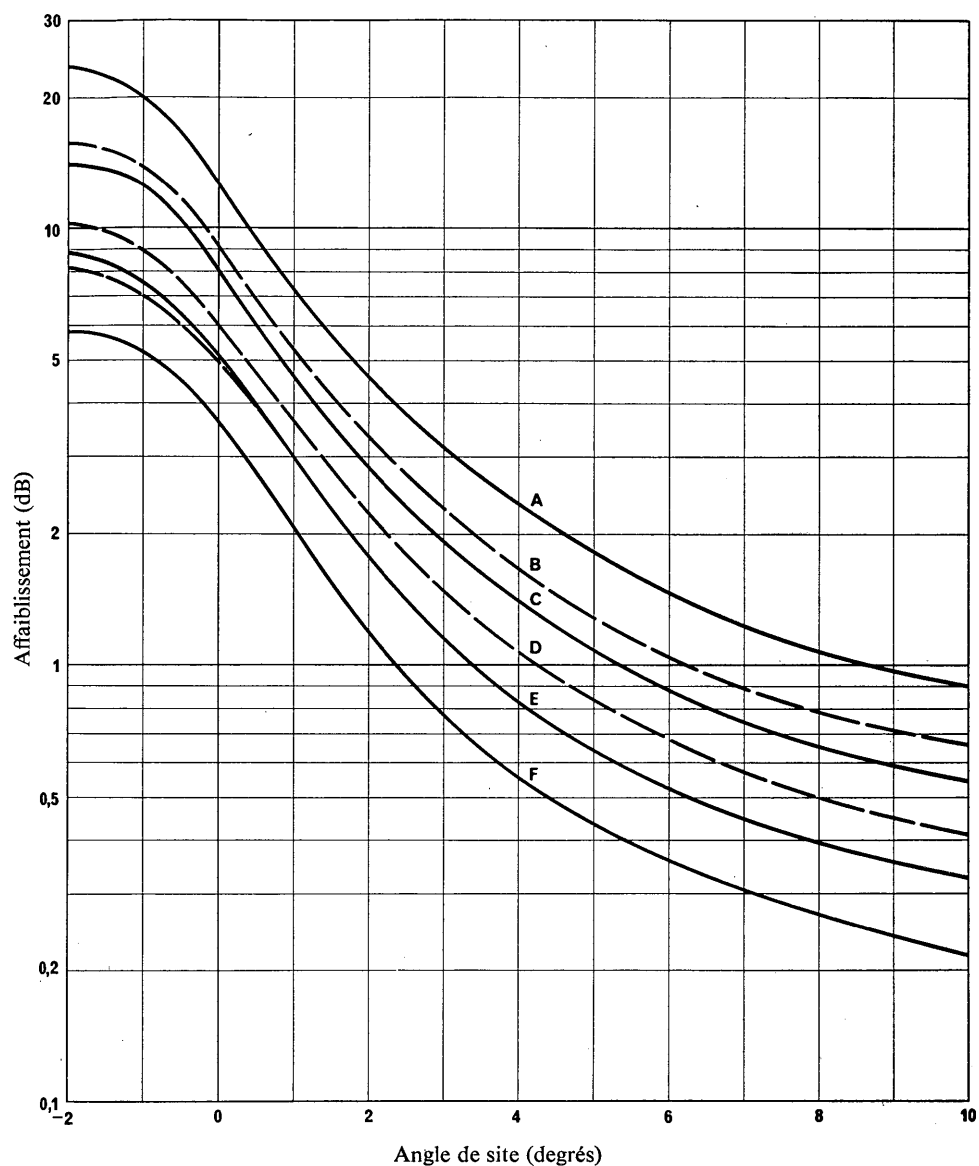


FIGURE 2

Valeur de l'affaiblissement total dû à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau, y compris les effets de défocalisation, non dépassé pendant 20% (courbes en trait plein) et pendant 0,01% (courbes en tirets) du mois le moins humide

- A: 30 GHz (20%)
- B: 30 GHz (0,01%)
- C: 18 GHz (20%)
- D: 18 GHz (0,01%)
- E: 11 GHz (20%; partie en tirets: 0,01%)
- F: 4 GHz (20% et 0,01%)

SECTION 5G: FACTEURS DE PROPAGATION INTERVENANT DANS LES BROUILLAGES

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 452-1 *

**DONNÉES RELATIVES A LA PROPAGATION POUR L'ÉVALUATION
DES BROUILLAGES DANS LES SERVICES SPATIAUX OU DANS LES SERVICES
DE TERRE OU ENTRE EUX ET POUR LE CALCUL DES DISTANCES DE COORDINATION**

(1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) le § 2.9 de la Recommandation N° Spa2-15 de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales (Genève, 1971);
- b) le fait que, pour calculer des niveaux de brouillage, on doit disposer de données appropriées sur la propagation,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

- 1. que, pour évaluer les niveaux de brouillage aux fréquences supérieures à 600 MHz environ, les administrations utilisent les méthodes de calcul décrites dans le Rapport 569;
- 2. que, pour évaluer les niveaux de brouillage aux fréquences inférieures à 600 MHz environ, les administrations utilisent les méthodes de calcul décrites, selon le cas, dans l'Avis 370-2 et dans les Rapports 239-3 et 425-1 (bien que ces trois textes se réfèrent essentiellement au service de radiodiffusion);
- 3. que les administrations informent le Directeur du C.C.I.R. des difficultés qu'elles pourraient rencontrer à cette occasion et qu'elles lui signalent toute amélioration de ces méthodes qu'elles pourraient juger souhaitable.

* Cet Avis doit être soumis aux Commissions d'études 4 et 9.

RAPPORT 569 *

**ÉVALUATION DES FACTEURS DE PROPAGATION LIÉS AUX PROBLÈMES DE BROUILLAGE
AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 0,6 GHz ENVIRON**

(1974)

1. Introduction

Du fait de l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, il a fallu partager les fréquences entre un certain nombre de services utilisant des systèmes entièrement de Terre ainsi que des systèmes mixtes Terre/espace. Il existe donc des possibilités de brouillage entre systèmes de Terre ainsi qu'entre systèmes de Terre et systèmes spatiaux. En conséquence, l'ingénieur chargé de la planification de ces systèmes doit savoir comment définir un signal fiable en l'absence de brouillage et comment évaluer le brouillage qui peut se produire en raison du partage des fréquences avec d'autres systèmes. C'est cette deuxième question, concernant l'apparition de brouillages, qui est traitée dans le présent Rapport; on y trouvera aussi la description de méthodes d'évaluation quantitative de ce facteur pour les fréquences supérieures à 0,6 GHz environ.

Pour évaluer les brouillages entre différents systèmes radioélectriques, il est nécessaire de connaître la répartition statistique de la différence en décibels entre les niveaux du signal brouilleur et du signal utile. Pour la plupart des systèmes radio, sauf les faisceaux hertziens troposphériques, le niveau du signal utile peut être considéré approximativement comme constant pendant la plus grande partie du temps.

C'est pourquoi il est indispensable que l'ingénieur dispose de statistiques sur les conditions d'apparition du brouillage, dont la variation est due à l'existence de plusieurs mécanismes différents de propagation, chacun d'eux étant à son tour sujet à des variations qui découlent des caractéristiques du milieu de propagation au niveau de la troposphère. Les modifications du milieu de propagation sont fonction du climat et il est nécessaire de tenir compte des effets liés aux caractéristiques de propagation par temps clair et des phénomènes qui peuvent se produire en raison de la présence de pluie sur le trajet de propagation.

Les méthodes décrites dans le présent Rapport portent essentiellement sur l'évaluation de l'intensité des signaux sur des trajets de point à point. Dans la plupart des cas, les stations de faisceaux hertziens se trouvent dans des sites exposés. Il devrait néanmoins être également possible d'appliquer les données de propagation indiquées dans le présent Rapport à des problèmes spécifiques de brouillage liés à la planification d'autres services, notamment les services de radiodiffusion et les services mobiles. A cet effet, il faudra prévoir des tolérances pour les affaiblissements supplémentaires dus aux irrégularités du terrain, à la végétation, aux constructions dans le voisinage des stations de ces services. Le Rapport 239-3 contient des informations sur ces affaiblissements supplémentaires.

Pour la planification des systèmes, il est généralement nécessaire d'évaluer le niveau de brouillage qui ne doit pas être dépassé pendant plus de 1 % du temps des mois les plus défavorables et, dans certains cas, pendant plus de 20 % du temps. Une grande partie du présent Rapport traite uniquement des méthodes d'évaluation du brouillage qui ne doit pas être dépassé pendant des pourcentages de temps de l'ordre de 1 % et moins. Lorsque les données de propagation pertinentes ne figurent pas dans d'autres Rapports du C.C.I.R., on les a indiquées ici pour l'évaluation du niveau de brouillage qui n'est pas dépassé pendant plus de 20 % du temps. Pour évaluer les brouillages peu intenses, les principaux modes de propagation à prendre en considération sont les suivants:

- visibilité directe;
- diffraction sur des obstacles isolés;
- diffraction sur les irrégularités du terrain;
- diffusion troposphérique vers l'avant.

* Adopté à l'unanimité.

Les autres mécanismes à considérer pour évaluer les brouillages de niveau plus élevé qui ne se produisent toutefois que pendant des petits pourcentages de temps, habituellement de l'ordre de 1 % ou moins, sont les suivants :

- propagation guidée (superréfraction provoquant la formation de couches ou de conduits);
- diffusion par les hydrométéores (surtout la pluie).

Les méthodes permettant de prévoir l'affaiblissement de transmission pour chacun de ces mécanismes de propagation sont fondées sur l'utilisation de données relatives aux caractéristiques suivantes : configuration du trajet, caractéristiques générales ou spécifiques de la surface terrestre, conditions climatiques générales ou spécifiques et certaines caractéristiques des stations; toutefois, les divers mécanismes de propagation ne réagissent pas tous de la même manière à ces caractéristiques, et ils ne présentent pas non plus les mêmes variations dans le temps. Il est donc nécessaire de déterminer l'affaiblissement de transmission pour chaque mécanisme et de déterminer ceux qui produisent le champ le plus élevé dans des conditions données. Généralement, la prédominance de l'un de ces mécanismes est telle que l'on peut négliger les autres.

Dans tous les cas autres que ceux de la diffusion troposphérique vers l'avant et de la diffusion par la pluie, les données de propagation indiquées dans le présent Rapport sont spécifiées en termes d'affaiblissement, en décibels par rapport à la transmission en espace libre. Par ailleurs, les caractéristiques de propagation associées à la diffusion par la pluie dépendent des diagrammes de rayonnement des antennes, et il est donc commode de présenter les données en termes d'affaiblissement de transmission, c'est-à-dire du rapport, en dB, entre la puissance appliquée à l'antenne d'émission et la puissance à l'entrée du récepteur radioélectrique à l'autre extrémité du trajet.

Il existe toutefois un facteur de brouillage qui ne peut pas être étudié quantitativement dans ce contexte. Le brouillage dû à une diffusion causée par un aéronef se caractérise par une courte durée et une intensité relative élevée, le couplage entre les deux faisceaux d'antenne étant effectué par l'aéronef lui-même. La probabilité d'apparition de ce phénomène dépend de la fréquence des mouvements des aéronefs dans les intersections des faisceaux principaux ou des lobes secondaires des antennes. Il faut donc éviter de placer ces intersections au voisinage des couloirs de navigation aérienne, notamment de ceux où le trafic aérien est intense. C'est un facteur à prendre en considération du point de vue de la propagation lorsque le service en est au stade de la planification.

Il n'est pas encore possible de faire une évaluation parfaitement rigoureuse du brouillage qui se produira dans des conditions déterminées mais les méthodes proposées dans le présent Rapport permettront généralement de faire le plan initial d'un système de façon à éviter de grandes difficultés de brouillage. En outre, ces méthodes aideront à déterminer les conditions dans lesquelles il y a une grande probabilité de brouillage nuisible et pour lesquelles il vaut donc la peine de faire des calculs plus rigoureux fondés sur des données détaillées d'ordre topographique et climatologique.

2. Mécanismes de propagation et caractéristiques des trajets

Pour calculer l'affaiblissement on doit connaître quel est le mécanisme de propagation qui se produit. Cependant les données de départ sont plutôt les caractéristiques géographiques des trajets. Il est donc nécessaire d'établir une classification des mécanismes de propagation et des caractéristiques des trajets.

2.1 Mécanismes de propagation

Tous les mécanismes de propagation peuvent être classés en deux catégories : la propagation de surface (visibilité directe et propagation par onde de sol) et la propagation de volume.

2.1.1 Propagation de surface

Dans cette catégorie, la surface de la Terre intervient par la réflexion et la diffraction tandis que l'atmosphère située au-dessus de cette surface exerce un effet global de réfraction.

Pour des raisons d'ordre pratique, on fait souvent une distinction entre les trajets en visibilité directe (c'est-à-dire ceux pour lesquels la diffraction peut être négligée) et les trajets transhorizon. Il convient toutefois de noter qu'un trajet de brouillage assez long peut être tantôt en visibilité directe et tantôt transhorizon, selon la valeur du gradient vertical de l'indice de réfraction de l'atmosphère au moment considéré.

Ceci est illustré par les Fig. 1a et 1b qui montrent, pour les fréquences de 4 et 12 GHz respectivement, l'affaiblissement dû à la diffraction par une Terre sphérique lisse, en fonction du gradient vertical de l'indice de réfraction (Rapport 233-3). Les antennes sont supposées placées à des hauteurs typiques de 100 mètres et 15 mètres.

On peut voir d'après ces figures que, pour un trajet de 150 km, lorsque le gradient vertical de l'indice de réfraction est positif ou moins négatif que -140 unités N/km , le trajet est, d'abord, un trajet de diffraction avec un affaiblissement élevé puis, lorsque le gradient est compris entre -140 et -157 N/km , cet affaiblissement diminue et le trajet devient un trajet en visibilité directe. Au-delà de -157 N/km , il se forme un conduit troposphérique avec un affaiblissement faible. Dans ce cas, en raison de la hauteur limitée du conduit, il n'est généralement pas possible que le trajet direct existe et l'on ne trouve que des trajets comportant plusieurs points de réflexion sur le sol.

On peut trouver également des cas plus complexes comme celui des conduits en altitude.

Pour tous ces mécanismes de surface, la propagation s'effectue plus ou moins suivant un arc de grand cercle.

2.1.2 Propagation de volume

La propagation de volume est due à la diffusion par la structure fine de la troposphère.

La surface de la Terre ne joue aucun rôle, si ce n'est pour limiter la configuration du trajet. Les deux principaux mécanismes de propagation appartenant à cette catégorie sont, d'une part, la diffusion troposphérique causée par les variations de l'indice de réfraction dues à la composition gazeuse de l'atmosphère et, d'autre part, la diffusion causée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, notamment les gouttes de pluie.

La diffusion troposphérique existe en permanence et la propagation qui en résulte s'effectue suivant un arc de grand cercle, généralement avec un affaiblissement très important.

La diffusion par les précipitations n'apparaît qu'en cas de précipitation effective en des points déterminés de l'atmosphère; c'est le seul mécanisme dans lequel la propagation s'effectue de façon notable en dehors du plan du grand cercle. Plus le taux de précipitation est élevé, plus la diffusion est forte, et l'affaiblissement du signal brouilleur peut alors être relativement minime.

2.2 Caractéristiques des trajets

Pour évaluer le brouillage, il faut considérer deux types de trajets. Tous les modes de propagation autres que la diffusion par des particules produisent le champ maximal dans le plan du grand cercle passant par l'émetteur et le récepteur; il suffit donc, dans ce cas, d'étudier les trajets contenus dans le plan d'un grand cercle. Au contraire, la diffusion par les particules ne se limite pas au plan du grand cercle mais dépend très étroitement des caractéristiques de rayonnement et des caractéristiques géométriques des antennes des stations d'émission et de réception; les caractéristiques du terrain ont peu d'effet, à ceci près qu'elles limitent les caractéristiques de rayonnement des antennes.

2.2.1 Trajets situés dans le plan du grand cercle

Pour évaluer l'affaiblissement sur un trajet qui suit un arc de grand cercle, il est nécessaire de déterminer le profil effectif du trajet.

La valeur saisonnière maximale de ΔN , servant à localiser le trajet étudié doit être déterminée d'après les Fig. 4-7 du Rapport 563. On calcule alors le rayon équivalent de la Terre « ka » d'après l'expression:

$$ka \simeq (\Delta N \cdot 10^{-6} + 1/a)^{-1} \quad \text{km} \quad (1)$$

où $a = 6400$ km est le rayon terrestre réel. Pour un long trajet, il faut utiliser la *moyenne* de la plus grande valeur saisonnière de ΔN .

En utilisant ce rayon équivalent de la Terre ainsi que les données relatives au profil du terrain le long du trajet, on peut déterminer le type de trajet simplement par la géométrie. Il est utile d'établir une distinction entre les types suivants:

- a) les trajets en visibilité directe, y compris avec incidence rasante;
- b) les trajets transhorizon, avec au maximum trois grands obstacles isolés mais sans obstruction par la courbure de la surface terrestre; on a alors un trajet de diffraction sur une lame de couteau;
- c) les trajets transhorizon, avec au maximum trois grands obstacles isolés et tels que la courbure de la surface terrestre obstrue également le trajet; on peut dire qu'il s'agit d'un trajet avec diffraction sur une lame de couteau étendue;
- d) les trajets transhorizon, avec plus de trois grands obstacles ou un terrain très irrégulier ($\Delta H \geq 200$ m) *. Ce cas est celui d'un trajet au-dessus d'un terrain irrégulier;
- e) les trajets transhorizon sans grands obstacles (notamment les trajets maritimes) ($\Delta H < 200$ m) *. Ce cas est celui d'un trajet au-dessus d'une terre uniforme.

On peut déterminer le profil effectif du trajet pour les pourcentages de temps intéressants, d'après les données statistiques établies pour les valeurs de ΔN .

2.2.2 Trajets situés en dehors du plan du grand cercle

La diffusion due à la pluie est essentiellement isotrope. Par conséquent, le trajet à affaiblissement de transmission minimal dépendra de la distribution de la densité de la pluie dans la troposphère et des relations géométriques entre les orientations des antennes.

3. Calcul de l'affaiblissement de transmission pour les mécanismes de propagation de surface

3.1 Visibilité directe

Lorsque les calculs montrent que, pour le rayon terrestre équivalent déterminé selon les indications du § 2 pour des conditions de référence à long terme, le trajet de propagation étudié est en visibilité géométrique, on peut tout d'abord supposer que l'affaiblissement de transmission de référence est égal à l'affaiblissement en espace libre. Les valeurs obtenues doivent ensuite être augmentées pour tenir compte de l'absorption gazeuse, que l'on peut évaluer d'après les courbes de la Fig. 1 du Rapport 233-3, en supposant que la densité de la vapeur d'eau dans différentes régions du monde a les valeurs suivantes:

trajet terrestre, latitude $\geq 23^\circ$	: 1 g/m ³
trajet maritime, latitude $\geq 23^\circ$	} : 2 g/m ³
trajet terrestre, latitude $< 23^\circ$	
trajet maritime, latitude $< 23^\circ$	: 5 g/m ³

Le résultat obtenu représente la valeur de référence à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence. L'affaiblissement qui n'est pas dépassé pendant $p\%$ du temps est alors:

$$A_s + A_g + A_p \quad (2)$$

dans laquelle A_s est l'affaiblissement en espace libre,

A_g est l'affaiblissement dû à l'absorption gazeuse,

A_p est la somme statistique des effets de focalisation instantanés et des trajets multiples entre rayons qui arrivent par des chemins différents dans l'atmosphère. Les valeurs de A_p qui ne sont pas dépassées pendant un petit pourcentage p du temps sont données dans le Tableau I.

TABLEAU I

A_p en décibels par rapport à l'espace libre, non dépassé pendant plus de $p\%$ du temps

p	1	0,1	0,01	0,001
A_p	-4,5	-6,0	-7,0	-8,5

* ΔH est la différence entre les hauteurs dépassées en 10% et 90% des points d'une section d'un trajet. Pour les sections maritimes ΔH est supposé égal à zéro.

Les valeurs indiquées dans le Tableau I s'appliquent à des trajets de 50 km et plus; pour les distances inférieures, elles peuvent être réduites en proportion.

Pour évaluer l'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant 20 % du temps, il faut augmenter l'affaiblissement en espace libre de 1,5 dB sauf lorsque la configuration du trajet montre qu'il y a incidence rasante ou quasi rasante sur le terrain situé le long du trajet (c'est-à-dire dans les limites des 2/3 de la première zone de Fresnel). La diffraction peut alors produire un affaiblissement inférieur aux valeurs en espace libre. Toutefois, pour évaluer cet affaiblissement, il faut connaître les valeurs appropriées du gradient du coïndice au sol; la méthode de calcul est décrite dans les Rapports 568 et 570.

3.2 *Trajets transhorizon*

Les méthodes générales d'évaluation de l'affaiblissement dû à la diffraction par le sol sont étudiées dans les Rapports 568 et 570. La méthode de prévision indiquée ci-après complète ces informations.

La diffraction par la courbure de la surface terrestre provoque un affaiblissement important dans les conditions normales de réfraction. Même en l'absence des conditions de superréfraction, le champ dû à la diffraction sur la courbure de la surface terrestre peut prendre de l'importance. Pour une Terre « régulière », l'affaiblissement dû à la diffraction dépend du rayon terrestre équivalent, donné par l'expression (1) du § 2 (voir les Fig. 1a et 1b).

En cas de superréfraction très intense dans l'atmosphère (gradient de l'indice de réfraction s'abaissant au-dessous de -120 N/km environ) l'affaiblissement effectif diminue rapidement et, à partir de -157 N/km, on observe la formation de conduits radioélectriques. Bien qu'étant très différents dans leurs principes, ces deux modes de propagation, par superréfraction et par conduits radioélectriques, ont néanmoins plusieurs caractéristiques communes :

- Dans les deux cas, la propagation est essentiellement déterminée par la nature du terrain (configuration, végétation) et par les caractéristiques des couches inférieures de l'atmosphère (jusqu'à quelques centaines de mètres au maximum).
- Dans les deux cas, le niveau du signal reçu est une fonction quasi exponentielle de la distance. En effet, dans le cas de la diffraction, cette fonction exponentielle constitue une bonne approximation des fonctions plus compliquées qui devraient être utilisées et, dans le cas de la propagation par conduits, elle est due à l'affaiblissement résultant des imperfections du mécanisme de guidage, tout comme pour n'importe quelle ligne de transmission.

En résumé, il y a continuité entre les deux phénomènes, les lois applicables sont de forme similaire, et la nature du terrain est un paramètre important.

3.2.1 *Diffraction par des arêtes en lame de couteau*

Ce mécanisme s'applique à des trajets comportant au maximum 3 grands obstacles distincts, chacun étant visible des obstacles voisins ou d'une extrémité.

On détermine l'affaiblissement sur ce type de trajet, par rapport à l'affaiblissement en espace libre, en appliquant l'équation (3.1) du Rapport 570 pour obtenir la valeur de référence à long terme. Si on a des obstacles arrondis dont le rayon de courbure dépasse 6 m, il se peut que la valeur prévue pour l'affaiblissement soit trop élevée et il convient donc d'utiliser cette donnée avec prudence. Lorsqu'il y a plus d'un obstacle, il faut déterminer l'affaiblissement séparément pour chacun d'eux, pour la section de trajet limitée soit par la station terminale visible et l'obstacle suivant, soit par les deux obstacles consécutifs (cas de trois obstacles). On applique ensuite pour la longueur totale du trajet, les corrections nécessaires pour tenir compte du pourcentage de temps et de l'absorption gazeuse, selon les indications données au § 3.1.

3.2.2 *Diffraction sphérique*

Ce mécanisme s'applique à des trajets ne comportant aucune grande arête de diffraction, et pour des pourcentages de temps de 20 % ou plus.

Pour obtenir l'affaiblissement sur un tel trajet par rapport à l'affaiblissement en espace libre, on applique l'équation (1) du Rapport 568. Pour un terrain irrégulier, on utilise le modèle à quatre rayons terrestres équivalents illustré par la Fig. 2, en calculant les valeurs de χ_1 , χ_2 et χ_0 comme suit:

$$\chi_1 = 670 d_{Lt} (f/a_1^2)^{1/3}$$

$$\chi_2 = 670 d_{Lr} (f/a_2^2)^{1/3}$$

$$\chi_0 = \chi_1 + \chi_2 + 670 f^{1/3} [d_{st} a_t^{-2/3} + d_{sr} a_r^{-2/3}]$$

où a_1 et a_2 sont les rayons terrestres équivalents pour les deux points terminaux du trajet, obtenus d'après les indications du § 2. La courbe de $F(x)$ donnée dans la Fig. 1 du Rapport 568 est à utiliser avec $K = 0,03$.

Lorsque le trajet passe au-dessus d'un terrain homogène, il faut utiliser un seul rayon terrestre équivalent: $a_1 = a_2 = a_t = a_r$, déterminé d'après la valeur moyenne de ΔN pour ce trajet (voir le § 2).

Pour estimer l'affaiblissement dû à la diffraction par rapport à l'affaiblissement en espace libre, non dépassé pendant plus de 20 % du temps, on utilise les courbes de la Fig. 3. Le paramètre d_e est défini comme suit:

$$d_e = \begin{cases} 130 d/d_{ref} \text{ km; } d \leq d_{ref} \\ 130 + d - d_{ref} \text{ km; } d > d_{ref} \end{cases} \quad (3a)$$

où d est la longueur totale du trajet et d_{ref} est défini comme suit:

$$d_{ref} = \begin{cases} 8,5 (33,52 f^{-1/3} + 2,3 - \theta_{et} - \theta_{er}) \text{ km} \\ \text{ou } 20 \text{ km, la plus grande valeur étant choisie} \end{cases} \quad (3b)$$

avec f = fréquence en MHz; θ_{et} et θ_{er} = angles de site à l'horizon aux extrémités du trajet en milliradians.

3.2.3 Superréfraction et guidage

Ce mécanisme s'applique à des trajets ne comportant aucune grande arête de diffraction, et pour des pourcentages de temps très faibles.

3.2.3.1 Méthode de calcul

Cette méthode est fondée sur le calcul de la propagation de l'énergie dans un conduit troposphérique. Toutefois, elle est également valable en cas de forte superréfraction sans formation de conduits, en raison de la ressemblance entre les fonctions mathématiques dans les deux cas.

Il a été démontré que l'affaiblissement de transmission au-dessus de l'affaiblissement en visibilité directe, A , non dépassé pendant de faibles pourcentages de temps, et dû à la superréfraction et à la formation de conduits, peut s'exprimer par:

$$A = -10 \log d + 10 \log (2d_0) + (C_a + C_s) d \quad \text{dB} \quad (4)$$

où:

d : longueur du trajet en km;

C_a : coefficient de fuite qui dépend de l'atmosphère (Tableau II); il est indépendant de la fréquence entre 0,6 et 15 GHz;

C_s : coefficient de fuite qui dépend de la surface terrestre, de ΔH et de la fréquence (Fig. 4);

d_0 : distance minimale de couplage dans le conduit radioélectrique, en kilomètres, qui dépend des conditions radioclimatiques et du pourcentage de temps (Tableau III).

TABLEAU II

Valeurs du coefficient de fuite, C_a , (dB/km)

Pourcentage de temps	0,001 %	0,01 %	0,1 %	1 %
Zones dans lesquelles la valeur mensuelle maximale de ΔN est: *	C_a (*)			
> 80	(1)	(1)	(1)	(1)
$55 < \Delta N < 80$ (2)	$0,7 \times 10^{-2}$ (5)	2×10^{-2}	$3,2 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$
$40 < \Delta N < 55$ (3)	$0,7 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}	$3,8 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-2}$
$\Delta N < 40$	Aucune donnée disponible			

* Valeurs extraites des Fig. 4, 5, 6 et 7 du Rapport 563.

(1) Aucune mesure n'a été faite. Les valeurs de C_a sont probablement inférieures ou, à tout le moins, égales à celles de la zone suivante ($55 < \Delta N < 80$).

(2) Données vérifiées pour la zone méditerranéenne.

(3) Données vérifiées sur des trajets situés au nord-ouest de l'Europe et dans la partie nord-ouest de l'U.R.S.S., ainsi que sur la mer du Nord, la Manche et la mer Baltique.

(4) Ces valeurs suivent une loi gaussienne et peuvent être interpolées.

(5) Valeur obtenue par extrapolation.

TABLEAU III

Valeurs de $10 \log (2d_0)$

Pourcentage de temps	0,001 %	0,01 %	0,1 %	1 %
Zones dans lesquelles la valeur mensuelle maximale de ΔN est: *	XX	2	5	6
> 80 (1)				
$55 < \Delta N < 80$ (2)	6,0	6,5	7	8,5
$40 < \Delta N < 55$ (3)	6,5	7	8	11
$\Delta N < 40$ (4)	Aucune donnée disponible			

* Valeurs extraites des Fig. 4, 5, 6 et 7 du Rapport 563.

(1) Données vérifiées au voisinage de Dakar.

(2) Données vérifiées pour la zone méditerranéenne.

(3) Données vérifiées sur un trajet terrestre au nord-ouest de l'Europe et dans la partie nord-ouest de l'U.R.S.S., ainsi que sur la mer du Nord, la Manche et la mer Baltique.

(4) Ces valeurs suivent une loi de Gauss et peuvent être interpolées.

Note. — Dans les cartes du Rapport 563, les courbes des isogradients sont assez approximatives; de nombreuses données sont donc encore nécessaires pour mieux déterminer les valeurs de $2d_0$ dans les différentes régions du globe.

Les variations de $2d_0$ d'une zone à l'autre sont faibles. Pour les trajets couvrant plusieurs zones, il suffira de prendre la valeur représentative de $10 \log (2d_0)$ pour la zone dans laquelle ΔN a les plus grandes valeurs.

Pour évaluer la quantité d'énergie introduite par couplage dans ce mode de propagation, lorsque l'une des extrémités, ou les deux, voient l'horizon sous un angle de site positif, il faut ajouter à la valeur de l'affaiblissement une perte supplémentaire qui peut être déterminée comme un affaiblissement dû à la diffraction sur une lame de couteau unique, avec l'hypothèse que l'angle de diffraction θ est égal à l'angle de site de l'horizon θ_e .

Pour évaluer cet affaiblissement supplémentaire à 4 GHz, on peut utiliser les courbes de la Fig. 5. Pour d'autres fréquences, il faut ajouter le terme correctif $10 \log \left(\frac{f}{4} \right)$ dB, dans lequel f est la fréquence en GHz.

3.2.3.2 Application

Si le trajet est entièrement maritime, C_s est égal à zéro.

Si le trajet est mixte et passe au-dessus de terrains ayant des caractéristiques différentes ou des tronçons maritimes, on remplace, dans l'équation (4), le terme $(C_a + C_s) d$ par:

$$C_a d + \sum_1^n C_{si} d_i \quad \text{où} \quad \sum_1^n d_i = d$$

Pour les tronçons maritimes, $C_{si} = 0$.

3.2.3.3 Affaiblissement total

Etant donné que l'équation (4) exprimant A en dB s'applique à l'affaiblissement en visibilité directe, l'affaiblissement total sera la somme de A et:

- de l'affaiblissement en espace libre, en dB;
- de l'absorption gazeuse, en dB (voir le § 3.1).

3.2.4 Combinaison de plusieurs mécanismes

Pour certains trajets on peut être amené à considérer une combinaison de plusieurs des mécanismes précédents. Le cas le plus important est celui où le trajet comporte des arêtes de diffraction qui ne sont pas visibles l'une de l'autre ou d'une extrémité.

On évalue l'affaiblissement par rapport à l'affaiblissement en espace libre selon les indications données dans la section précédente, sans tenir compte de la présence d'un ou de plusieurs obstacles isolés, et on ajoute au résultat obtenu: les valeurs appropriées de l'affaiblissement supplémentaire (lame de couteau) obtenues selon la méthode indiquée dans le § 3.2.1, et l'affaiblissement supplémentaire dû à la partie du trajet qui n'est pas visible du sommet de l'obstacle; on peut obtenir cette donnée en se référant aux indications du § 3.2 ci-dessus.

4. Diffusion troposphérique vers l'avant

Pour les trajets transhorizon, notamment ceux qui dépassent 150 km environ, la diffusion troposphérique vers l'avant peut être le mode de propagation qui détermine le brouillage; il s'agit là encore d'un mode de propagation sur un arc de grand cercle.

La valeur médiane à long terme L_{50} de l'affaiblissement de transmission, due à la diffusion troposphérique vers l'avant, peut être déterminée de la façon indiquée dans le Rapport 238-2.

Pour évaluer l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique vers l'avant, non dépassé pendant 20 % du temps, il faut ajouter à L_{50} le facteur de variation dans le temps $Y(q)$, pour 80 % du temps. On peut obtenir la valeur appropriée de $Y(q)$, pour 80 % du temps, pour une distance effective d_e , par interpolation des valeurs données sur les Fig. 4 à 10 inclusivement du Rapport 238-2. On obtient ainsi: $Y(q)$ pour 80 % du temps = 0,65 $Y(q)$ pour 90 % du temps. Cette méthode implique que la distribution statistique de l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique vers l'avant est symétrique par rapport à sa valeur médiane.

La même méthode s'applique aussi aux faibles pourcentages de temps. Ainsi, par exemple, on obtient l'affaiblissement non dépassé pendant plus de 0,01 % du temps en ajoutant à L_{50} la valeur appropriée de $Y(q)$ pour 99,99 % du temps.

Le brouillage sur un trajet qui suit un arc de grand cercle en passant par le faisceau principal d'une antenne de station terrienne peut être dû également à la diffusion troposphérique vers l'avant. Dans ce cas, on peut déterminer l'affaiblissement de transmission pour différents pourcentages de temps en appliquant la méthode indiquée ci-dessus, avec cette différence que la distance angulaire θ à utiliser est ici l'angle formé, le long du trajet suivant l'arc de grand cercle, par le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne et le rayon tangent provenant de la station de Terre.

Dans certains cas, cette méthode peut conduire à une sous-estimation de l'intensité des signaux brouilleurs pendant 1 % du temps et moins. On dispose d'un petit nombre de résultats de mesure montrant comment l'affaiblissement de transmission dépassé pendant 99 % du temps augmente en même temps qu'augmente au-dessus de l'horizon l'angle de site du faisceau principal de l'antenne de la station

terrienne, dans le plan du grand cercle d'un trajet transhorizon *. A l'heure actuelle toutefois, on ne dispose pas de données suffisantes pour spécifier une méthode permettant de prévoir cette fonction aux fins d'application générale à tous les types de trajets transhorizon.

5. Brouillage dû à la diffusion par les précipitations

Pour les modes de propagation étudiés dans les § 3 et 4, le signal subit une diffraction ou une diffusion vers l'avant dans le plan du grand cercle contenant l'émetteur et le récepteur. Par ailleurs, dans la diffusion par les précipitations, l'énergie subit — en première approximation — un rayonnement secondaire isotrope. Ce mode peut donc causer du brouillage, même lorsque l'angle de diffusion est grand et lorsque l'intersection des faisceaux d'antenne se trouve en dehors du trajet le long du grand cercle. Le problème essentiel et important est celui du brouillage entre des stations terriennes et des stations de faisceaux hertziens de Terre. Il faut toutefois évaluer aussi le brouillage éventuellement causé à une station terrienne du service fixe par une station terrienne utilisée pour établir une liaison avec un satellite de radiodiffusion.

Plusieurs relations géométriques sont à envisager. Le premier cas est celui où de grandes parties des deux faisceaux principaux se coupent dans une zone d'orage et, dans ce cas, il peut se produire un couplage entre les faisceaux rayonnés par des stations séparées par de grandes distances (plusieurs centaines de kilomètres). Le second cas est celui où il y a quasi-intersection, ou encore couplage dans des intersections lobe principal/lobe latéral ou de lobe latéral/lobe latéral. Dans ces conditions, les gains équivalents des antennes sont plus faibles et ce brouillage est donc perçu à de moindres distances. Finalement, sur de courtes distances, moins de 100 km par exemple, l'intersection d'un lobe principal et d'un lobe latéral éloigné dans une zone d'orage intense peut causer du brouillage.

La configuration du trajet de brouillage dépend également des obstacles. Si un obstacle obstrue partiellement ou complètement le lobe d'une antenne, le couplage brouilleur introduit par ce lobe sera partiellement ou complètement éliminé sauf s'il se produit une diffraction. Bien entendu, ces obstacles ne se trouvent pas nécessairement sur le trajet de l'arc de grand cercle entre les stations.

Il convient de noter que l'intersection des lobes principaux et/ou latéraux des deux antennes n'a aucun effet si elle se produit au-delà de l'altitude de coupure, au-dessus de laquelle il n'y a aucune précipitation humide, quelle que soit la combinaison des lobes. Le Rapport 563 indique les valeurs de l'altitude de coupure. Les informations contenues dans le présent Rapport ne sont qu'un résumé sur des modèles d'affaiblissement de transmission correspondant aux conditions pratiques d'exploitation. La référence [Crane, 1974] contient un exposé plus général sur l'analyse fondamentale et les notions radiométéorologiques utilisées. Il convient de souligner qu'il serait très difficile et fastidieux de faire une évaluation rigoureuse des effets de la diffusion due aux précipitations dans toutes les conditions possibles. Il faudrait, par exemple, connaître les diagrammes polaires des antennes, notamment les lobes latéraux ainsi que l'intensité et la distribution spatiale des fortes pluies.

Les données relatives à ce dernier facteur sont encore extrêmement rares. Il faut donc faire plusieurs hypothèses fondamentales pour obtenir des résultats quantitatifs sous une forme commode et utilisable dans la pratique.

Tout d'abord, des courbes de base sont établies pour les cas d'intersection des faisceaux. Ces résultats sont ensuite complétés par des données portant sur le cas de quasi-intersection. Finalement, on considère le cas d'un couplage entre le faisceau principal et un lobe latéral éloigné.

5.1 Hypothèse de base

La section de diffusion par unité de volume η , pour la diffusion due à la pluie est donnée par l'expression suivante:

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2 Z \times 10^{-18}}{\lambda^4} \quad \text{m}^{-1} \quad (5)$$

dans laquelle $|K|^2 = |(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)|^2$,

ϵ : étant la constante diélectrique de l'eau $\approx 0,9$

λ : longueur d'onde (m)

Z : facteur de réflectivité (mm^6/m^3).

* Un aspect de ce problème est décrit dans le Rapport 238-2.

Le calcul de l'affaiblissement de transmission pour différents climats et différents pourcentages de temps exige que l'on fasse une estimation de Z en fonction de l'altitude et du volume associé à la valeur estimée de Z . On peut définir deux types principaux de pluies d'après les données reportées sur les courbes de distribution cumulative temporelle du Rapport 563: les pluies d'orage et les pluies tombant sur de grandes étendues. Les pluies d'orage correspondent à la partie de chaque courbe dont la pente est la plus forte.

On a fait les calculs sur la base des hypothèses suivantes (Note 1):

- fréquence: 4 GHz
- gain de l'antenne de la station de Terre: 40 dB
- les effets de l'affaiblissement dû à l'absorption gazeuse et aux précipitations, à 4 GHz, ont été jugés négligeables
- caractéristiques de la pluie:

	Pluie « étendue »	Averse
Pourcentage de l'année	0,01 %	0,001 %
Intensité de précipitation (Note 2)	25 mm/h	85 mm/h
Diamètre de la cellule de précipitation	25 km	3 km
Hauteur du sommet de la pluie	3 km	7 km
Facteur de réflectivité (Note 3)	200 $R^{1,6}$	400 $R^{1,4}$

Note 1. — Les chiffres indiqués dans cet exemple correspondent approximativement à la zone hydro-météorologique 3 pendant 0,01 % et 0,001 % du temps respectivement, selon le Rapport 563. Comme indiqué ci-après au § 5.3, on peut tenir compte de données relatives à d'autres climats. Il faut, dans toute la mesure du possible, utiliser des données météorologiques locales confirmées. A défaut de celles-ci, on peut utiliser les données approximatives figurant dans le Rapport 563.

Note 2. — Ces intensités de précipitation sont des valeurs instantanées correspondant approximativement au taux moyen pour 1 minute.

Note 3. — On suppose que Z décroît de 1 dB/km entre le niveau du sol et les altitudes limites indiquées.

5.2 Courbes de base en cas d'intersection des faisceaux principaux

La Fig. 6 représente les relations géométriques dans le cas d'un brouillage entre une station terrienne et une station de faisceau hertzien de Terre. Pour les fréquences inférieures à 8 GHz, l'affaiblissement de transmission est donné par [Crane, 1974]:

$$L = 187 + 20 \log r - 20 \log \left(\frac{f}{4} \right) - 10 \log Z - 10 \log M - 10 \log G_T - 10 \log D \quad (6)$$

Dans cette relation on a:

L : affaiblissement de transmission en décibels

r : distance de la station de Terre au volume diffusant en kilomètres

f : fréquence en GHz

M : facteur de désadaptation des polarisations (≤ 1)

G_T : gain de l'antenne de la station de Terre

D : longueur effective du volume d'atmosphère pluvieuse le long du faisceau de la station terrienne, en kilomètres.

Cette longueur effective est donnée par:

$$\begin{aligned} 10 \log D &= 10 \log S \text{ pour } S < 2,5 r / (\sqrt{G_T} \sin \chi) \\ &= 5 \log G_T + 10 \log (\sin \chi) - 4 - 10 \log r \\ &\quad \text{pour } S \geq 2,5 r / (\sqrt{G_T} \sin \chi) \end{aligned} \quad (7)$$

où S est le diamètre moyen d'une cellule de pluie en kilomètres

χ est l'angle de diffusion (voir Fig. 6)

Le défaut d'adaptation des polarisations est inférieur ou égal à l'unité selon la valeur de l'angle de diffusion et les caractéristiques de polarisation de l'émetteur et du récepteur. Pour les calculs préliminaires, il est recommandé de prendre $M = 1$; pour faire des prévisions du brouillage, il faut utiliser dans les calculs les informations détaillées données dans [Crane, 1974].

En supposant que la diffusion suit la loi de Rayleigh, on a calculé L , pour des angles d'azimut de la station de Terre par rapport à la station terrienne, compris entre 0° et 180° et pour des angles de site du faisceau de l'antenne de la station terrienne atteignant 30° (voir les Fig. 7 et 8).

Ce qui précède suppose qu'il n'y a aucune précipitation entre la source de brouillage et l'orage isolé situé dans le volume commun et dont on a considéré que l'intensité de précipitation était de 85 mm/h. La probabilité d'apparition d'un cas particulier de ce genre est nettement moindre que celle d'un cas où il y aurait, dans le volume commun, une précipitation dont l'intensité serait de 85 mm/h ainsi que d'autres précipitations le long du faisceau rayonné par la station brouilleuse.

La Fig. 7 donne des exemples de courbes de l'affaiblissement de transmission, lorsque le faisceau de l'antenne de la station terrienne est pointé vers la droite et lorsque des pluies « étendues » remplissent le volume commun [$S > 2,5 r / (\sqrt{G_T} \sin \chi)$]. La Fig. 8 donne des courbes correspondant au cas de l'intersection des faisceaux dans une pluie d'orage ayant une intensité de précipitation de 85 mm/h [$S < 2,5 r / (\sqrt{G_T} \sin \chi)$]. Les Fig. 7 et 8 s'appliquent aux conditions indiquées au § 5.1 ci-dessus. Il existe un cas limite dans lequel aucune énergie n'est diffusée parce que tout le volume commun est situé au-dessus de l'altitude de coupure.

5.3 Adjonctions et corrections sur les courbes de base

5.3.1 Application à d'autres conditions climatiques

La hauteur des sommets des précipitations de type orageux est indiquée dans le Rapport 563 pour les cinq zones hydrométéorologiques.

Si tout le volume effectif de diffusion est contenu dans les limites d'une hauteur de 7 km, les données sont les mêmes pour toutes les classes de climat pluviométrique, pour n'importe quel taux de précipitation considéré. Par conséquent, les données de la Fig. 8, jusques et y compris la courbe correspondant à un affaiblissement de 145 dB, conviennent pour les climats pluviométriques des classes 1 et 2. Le Tableau IV récapitule les données supplémentaires pour les courbes correspondant à un affaiblissement supérieur à 145 dB pour le climat pluviométrique 2 (altitude de coupure: 11 km). Ces informations sont également valables pour le climat 1 (altitude de coupure: 15 km) jusqu'à la courbe correspondant à un affaiblissement de 150 dB. Le Tableau V présente succinctement les informations supplémentaires requises pour le climat 1.

5.3.2 Variations du taux de précipitation

Pour les taux de précipitation ayant une valeur différente de 85 mm/heure, il faut ajuster les valeurs de l'affaiblissement de transmission indiquées sur la Fig. 8 en soustrayant le terme $14 \log (R/85)$. Pour les pluies « étendues », il faut ajuster les valeurs de l'affaiblissement en soustrayant le terme $16 \log (R/25)$.

Si la pluie contient un peu de neige fondue ou de grêle, les valeurs de l'affaiblissement peuvent diminuer dans la limite de 10 dB.

5.3.3 Diamètre d'une cellule de précipitation orageuse

La relation entre le diamètre d'une cellule de précipitation orageuse et la distance, pour une valeur donnée de l'affaiblissement de transmission, est une fonction compliquée qui dépend de la configuration particulière du système. Il est toutefois possible de calculer des facteurs de correction approximatifs par lesquels il faut multiplier la valeur de la distance, dans le cas d'une cellule ayant un diamètre de 3 km (pour des valeurs données de l'affaiblissement de transmission et de l'angle de site), pour pouvoir passer à des cellules ayant d'autres diamètres. Pour une cellule ayant un diamètre de 4,5 km, le facteur de correction utilisé dans la Fig. 8 est d'environ 1,1 pour les affaiblissements de transmission compris entre 130 et 145 dB. Pour un affaiblissement plus élevé, la correction est négligeable. De même, pour une cellule de 1,5 km de diamètre, le facteur de correction (0,85 environ) s'applique pour les affaiblissements de transmission de 130 à 145 dB.

TABLEAU IV

Valeurs de la distance (km) pour un affaiblissement de transmission déterminé dans le climat de la zone hydrométéorologique 2

Angle d'azimut (degrés) Affaiblissement de transmission (dB)	0	30	60 à 120	150	180
	Distance (km)				
Angle de site 10°					
150	460	440	390	340	340
155	550	520	450	390	390
160	610	530	460	400	430
Valeur limite	620	540	470	410	510
Angle de site 20°					
150	430	420	400	370	370
155	510	500	470	430	430
160	570	520	490	460	490
Valeur limite	590	540	510	480	540
Angle de site 30°					
150	430	400	400	390	390
155	500	490	470	450	450
160	550	520	490	490	510
Valeur limite	580	560	530	510	560

TABLEAU V

Valeurs de la distance (km) pour un affaiblissement de transmission déterminé dans le climat de la zone hydrométéorologique 1

Angle d'azimut (degrés) Affaiblissement de transmission (dB)	0	30	60 à 120	150	180
	Distance (km)				
Angle de site 10°					
155	550	530	460	390	390
160	640	610	520	440	430
Valeur limite	710	630	540	450	560
Angle de site 20°					
155	510	500	460	430	430
160	470	570	530	490	490
Valeur limite	680	620	580	590	600
Angle de site 30°					
155	500	490	470	450	450
160	580	560	540	510	510
Valeur limite	660	630	600	570	610

5.4 Diffusion et affaiblissement en fonction de la fréquence

Dans l'hypothèse où la diffusion suit la loi de Rayleigh, la diminution de l'affaiblissement de transmission, pour des fréquences allant jusqu'à 15 GHz, est indiquée dans le Tableau VI. Cette correction s'applique aux pluies « étendues » et aux pluies de type orageux (Fig. 7 et 8 respectivement).

TABLEAU VI

Diminution de l'affaiblissement de transmission due à la variation des effets de la diffusion en fonction de la fréquence

Fréquence (GHz)	4	6	8	11	15	20
Diminution de l'affaiblissement de transmission (dB)	0	4	6	9	12	14

Lorsque la fréquence augmente, il faut tenir compte de l'effet de l'absorption [Crane, 1974]. Aux fréquences les plus élevées qui présentent de l'intérêt, 15 à 20 GHz, de fortes pluies « étendues » réduisent l'intensité du signal brouilleur de plusieurs dizaines de décibels, par rapport au cas d'une pluie d'orage. Pour le trajet allant de TS1 à ES sur la Fig. 9, qui traverse une cellule de précipitation orageuse ayant un diamètre de 3 km, l'affaiblissement de transmission est augmenté de 33 dB à 20 GHz pour un angle de site de 30°. Pour le même cas, sur le trajet compris entre TS2 et ES sur la Fig. 9, l'affaiblissement de transmission n'est augmenté que de 15 dB. La différence entre ces deux valeurs est due à l'écart entre les longueurs des trajets interceptés dans le volume de diffusion.

Dans cet exemple l'augmentation de l'affaiblissement de transmission due à l'atténuation fait plus que compenser la diminution d'affaiblissement calculée pour la seule diffusion (Tableau VI).

5.5 Intersection du faisceau principal de l'antenne d'une station terrienne et du premier lobe latéral de l'antenne d'une station de Terre

Si l'on considère que le premier lobe latéral de l'antenne de la station de Terre est un anneau entourant le faisceau principal, il est possible d'évaluer l'affaiblissement de transmission dans les cas de quasi-intersection. Lorsqu'on fait varier légèrement l'azimut du faisceau de l'antenne de Terre par rapport à l'intersection, l'affaiblissement de transmission augmente d'abord brusquement au moment où les faisceaux principaux se séparent, puis l'effet du premier lobe latéral devient prédominant. Cela se produit lorsqu'on déplace le faisceau de 2,5° à 3°. Les calculs peuvent être faits dans ces conditions, pour un trajet traversant une pluie d'orage, de la même façon que les calculs relatifs aux intersections des lobes principaux. On peut résumer les résultats en disant que, pour une courbe d'affaiblissement de transmission donnée s'appliquant au cas d'intersection des faisceaux principaux, on observe un affaiblissement supplémentaire compris entre 10 et 23 dB selon la configuration du trajet. Dans la plupart des cas, cette valeur est comprise entre 16 et 19 dB.

5.6 Brouillage introduit par les lobes latéraux éloignés de l'une des antennes

Si la séparation des faisceaux des antennes de la station terrienne et de la station de Terre dépasse les valeurs indiquées au § 5.5, il faut évaluer l'effet du rayonnement des lobes latéraux éloignés. Pour un calcul approché, en supposant que le rayonnement des lobes éloignés de l'antenne de la station de Terre équivaut (dans la direction de la station terrienne) au rayonnement d'une antenne isotrope, on peut trouver l'affaiblissement de transmission d'après l'équation (7) avec $G_T = 1$ et $M = 1$.

Cette équation est également applicable au cas (mentionné dans l'introduction) du brouillage causé à une station terrienne du service fixe par le rayonnement des lobes latéraux de l'antenne d'une station terrienne utilisée pour assurer une liaison avec un satellite de radiodiffusion. Les valeurs de l'affaiblissement à 4 GHz et 10 GHz sont indiquées dans le Tableau VII pour une cellule de précipitation orageuse ayant un diamètre de 3 km et se trouvant dans le faisceau de l'antenne de la station terrienne, et pour un taux de précipitation de 85 mm/h. Les résultats concernant cette dernière fréquence s'appliquent tout particulièrement au cas des brouillages entre les stations terriennes du service fixe et du service de radiodiffusion par satellite. (Les bandes de fréquences au voisinage de 12,5 GHz ont été attribuées en partage à ces services.)

TABLEAU VII

Valeurs de l'affaiblissement de transmission en cas de pluie d'orage dans le faisceau principal de l'antenne d'une station terrienne et dans les lobes latéraux éloignés (supposés être au niveau isotrope) de l'autre station terminale; l'absorption est supposée négligeable

Fréquence (GHz)	Affaiblissement de transmission (dB) pour $R = 85$ mm/h		
	$d = 30$ km	$d = 100$ km	$d = 200$ km
4	157	167	173
10	150	160	166

Ces valeurs impliquent que le faisceau de l'antenne de la station terrienne traverse la pluie sur une longueur de 4 km environ. On peut facilement obtenir les valeurs correspondantes pour d'autres longueurs et pour d'autres taux de précipitation, en utilisant l'équation (7). Pour un taux de précipitation de 25 mm/heure, l'affaiblissement augmente d'environ 5 dB. A 10 GHz, si le diamètre de la cellule de précipitation dépasse quelques kilomètres, l'affaiblissement augmente notablement en raison de l'absorption (voir le § 5.4). En outre, si les lobes latéraux ont un gain moins élevé que l'équivalent d'une source ou d'un récepteur isotrope, l'affaiblissement est augmenté davantage encore.

5.7 Mesures effectuées

Des mesures récentes faites pendant une année dans l'est des Etats-Unis d'Amérique ont montré qu'en cas d'intersection des faisceaux principaux des antennes d'une station terrienne et d'une station de Terre séparées par une distance de 50 à 80 km, les valeurs expérimentales de l'affaiblissement concordent avec les valeurs prévues d'après les taux de précipitation en surface, pour un volume de diffusion situé à une hauteur de 3 km. Pour un volume de diffusion situé à 6 km, les prévisions tendent à sous-estimer l'affaiblissement pendant 0,01 % de l'année. D'autres observations montrent que, pour les fréquences inférieures à 8 GHz, on a le droit d'admettre par hypothèse que la diffusion est du type Rayleigh et que les effets de l'absorption sont négligeables [Crane, 1974].

5.8 Conclusions générales

Le cas le plus gênant est celui de l'intersection des faisceaux principaux dans une pluie d'orage. Pour des pourcentages de temps compris entre 0,001 % environ dans une grande partie du nord-ouest de l'Europe et 0,01 % environ dans les régions équatoriales et le sud des Etats-Unis d'Amérique, des affaiblissements de 150 à 160 dB sont prévus pour des distances de 350 à 400 km aux fréquences de 4 à 10 GHz. Dans cette bande, l'affaiblissement supplémentaire aux fréquences élevées, dans une pluie d'orage, est approximativement égal à la diminution de l'affaiblissement due à la variation de la diffusion en fonction de la fréquence. Pour les fortes pluies plus « étendues », l'effet de l'absorption prédomine au-dessus de 10 GHz.

En cas d'intersection du faisceau principal de l'antenne d'une station terrienne et du premier lobe latéral de l'antenne d'une station de Terre (c'est-à-dire lorsque le faisceau de cette dernière est déplacé d'environ 3° par rapport à l'intersection exacte), l'affaiblissement dû à une pluie d'orage augmente d'environ 18 dB dans la plupart des cas, par rapport aux valeurs observées lorsqu'il y a intersection des faisceaux principaux.

Lorsqu'il s'agit de pluies plus « étendues » mais fortes néanmoins (qui sévissent pendant environ 0,01 % de l'année dans certaines parties du nord-ouest de l'Europe et pendant environ 0,05 % de l'année dans une grande partie des Etats-Unis d'Amérique et dans les régions équatoriales), des affaiblissements d'environ 160 dB sont prévus pour des distances de 250 à 300 km à 4 GHz. A 10 GHz, les effets de l'absorption peuvent augmenter l'affaiblissement de 15 à 20 dB.

On pourrait peut-être observer un brouillage inadmissible dû à la diffusion par les précipitations à l'intersection du faisceau principal de l'antenne d'une station terrienne et des lobes latéraux éloignés de l'antenne d'une station brouilleuse. Si le rayonnement de ces lobes latéraux équivaut à celui d'une antenne isotrope (hypothèse assez pessimiste), la cellule de très forte précipitation occupant le faisceau principal de l'antenne de la station terrienne causerait des affaiblissements de 157 dB et 167 dB à des espacements de 30 km et 100 km respectivement, à 4 GHz. A 10 GHz, l'affaiblissement serait inférieur d'environ 7 dB à ces valeurs si l'on néglige les effets de l'absorption dans la cellule localisée. Ce problème demande à être étudié plus avant, compte tenu des propositions concernant les services fonctionnant dans des bandes partagées, dont il est question au § 5.6.

6. Effet de l'affaiblissement dans l'atmosphère sur le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales

Si l'on considère le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales, les valeurs de l'affaiblissement de transmission par temps clair (valeurs non dépassées pendant de faibles pourcentages de temps) prennent une grande importance. Cet affaiblissement est dû essentiellement à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau, mais la défocalisation, ou étalement du faisceau, augmente beaucoup l'affaiblissement pour les petits angles de site. Pour des angles de site inférieurs à 5° et pour des pourcentages de temps inférieurs à 1 %, il faut tenir compte des effets de la scintillation troposphérique.

6.1 L'affaiblissement de transmission total, supérieur à l'affaiblissement en espace libre par temps clair, peut s'exprimer comme suit:

$$\gamma_{o0} r_{eo} + \frac{m}{10} \gamma_{w0} r_{ew} + D + S \quad \text{dB} \quad (8)$$

- γ_{o0} et γ_{w0} sont les coefficients d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau déterminés à la surface de la Terre. Sur la Fig. 2 du Rapport 233-3, γ_{o0} et γ_{w0} sont représentés en fonction de la fréquence. Il convient de noter que, sur cette figure, γ_{w0} correspond à une atmosphère dans laquelle la densité de la vapeur d'eau est de 10 g/m^3 . Il en résulte le facteur $m/10$ dans l'expression (8) ci-dessus.
- r_{eo} et r_{ew} sont les longueurs équivalentes du trajet à travers l'atmosphère. La longueur équivalente pour l'absorption par l'oxygène, r_{eo} , est celle du trajet d'une onde radioélectrique à travers une atmosphère de densité constante s'étendant de la surface de la terre à une altitude de 4 km environ et surmontée d'un espace vide. La longueur équivalente pour l'absorption par la vapeur d'eau, r_{ew} , est approximativement égale à la longueur correspondante à travers une atmosphère uniforme d'environ 2 km d'épaisseur.

Sur les Fig. 10a et 10b, r_{eo} et r_{ew} sont indiqués en fonction de l'angle de site ϵ et de la valeur de ΔN . Dans ce cas, ϵ est l'angle d'arrivée dans le plan vertical de la station de Terre, du trajet radioélectrique provenant de la station spatiale et *non pas* l'angle de site réel de la station spatiale. La relation entre ces deux angles dépend de la réfraction de l'atmosphère. On trouvera aux Fig. 4 à 7 du Rapport 563 des cartes mondiales des moyennes mensuelles de ΔN .

- m est la densité de la vapeur d'eau en g/m^3 (Fig. 11a et 11b).
- D est l'affaiblissement dû à la défocalisation ou étalement du faisceau (Fig. 12).
- S est l'affaiblissement (ou le gain) dû à la scintillation. On peut supposer que S est égal à zéro pour les angles de site supérieurs à 5° et pour les pourcentages de temps supérieurs à 1 % (Rapport 234-3, § 2.2). Pour les petits angles de site et les faibles pourcentages de temps, la scintillation peut causer un affaiblissement de transmission inférieur à l'affaiblissement en espace libre. On peut déduire de l'interprétation de certaines mesures que la scintillation est susceptible de diminuer l'affaiblissement de transmission d'une valeur pouvant aller jusqu'à 6 dB, aux angles de site compris entre 1° et 2° , pendant un pourcentage de temps ne dépassant pas 1 %, à 7 GHz *.

Les valeurs moyennes de m pour les mois de février et d'août ont été calculées [Bean et Dutton, 1966]; pour plus de commodité, ces valeurs sont reportées sur les Fig. 11a et 11b. En première approximation, on peut supposer que les caractéristiques statistiques des variations temporelles de m ont une distribution gaussienne avec un écart type, σ , égal à environ 0,25 fois la valeur moyenne de m . Par exemple, l'humidité absolue probablement dépassée pendant 99 % du temps serait de $1 - (0,25 \times 2,4) = 0,4$ fois la valeur moyenne. De même, la valeur dépassée pendant 99,99 % du temps serait de $1 - (0,25 \times 3,8) = 0,05$ fois la valeur moyenne.

En supposant que la défocalisation ou l'étalement du faisceau soient limités au plan vertical, on a alors, pour un angle de site ϵ , l'expression suivante:

$$D = 10 \log \left(1 - \frac{d\tau}{d\epsilon} \right) \quad (9)$$

dans laquelle τ est la réfraction atmosphérique.

Dans un précédent document du C.C.I.R. [C.C.I.R., 1966-1969], τ est indiqué en fonction de ϵ pour quatre valeurs de ΔN .

Sur la Fig. 12, D est représenté en fonction de ϵ et de ΔN .

* Voir le Doc. 5/72, Canada, 1970-1974.

- 6.2 La Fig. 2 du Rapport 564 est un exemple de l'utilisation qui peut être faite des trois premiers termes de l'équation (8) du § 6.1, et montre la valeur jusqu'à laquelle l'absorption et la défocalisation, données par l'équation (9), peuvent décroître, pour 20 % du mois le moins humide.

Il ne faut pas utiliser des courbes correspondant à 0,01 % du temps (Fig. 2 du Rapport 564) pour les fréquences inférieures à 20 GHz et pour les angles de site très bas, parce qu'on n'a pas tenu compte de l'effet de la scintillation pour les établir. On ne dispose pas encore de résultats de mesure de la scintillation pour les fréquences plus élevées. Ces courbes s'appliquent aux bandes des 4, 11, 18 et 29 GHz utilisées en partage par le service fixe par satellite et par le service fixe. Elles impliquent que, pendant le mois le moins humide dans la plupart des climats, la teneur en vapeur d'eau à la surface de la terre est inférieure à 2 gm/m³ pendant 20 % du temps au maximum. La valeur retenue pour ΔN est 30.

RÉSUMÉ

PROCÉDURE D'ÉVALUATION DU BROUILLAGE

A. Trajet suivant un arc de grand cercle

On trouvera ci-après un résumé indiquant comment il convient d'utiliser les informations données dans le présent Rapport en vue d'aider l'ingénieur, dans l'estimation de l'affaiblissement pour évaluer le brouillage.

1. Déterminer le profil du trajet équivalent suivant un arc de grand cercle dans les conditions de référence à long terme, en utilisant les indications du § 2.2.1. Lorsqu'il ne semble pas possible de classer nettement le trajet en fonction des modèles donnés au § 2.2.1, il peut être nécessaire d'évaluer le brouillage associé à la propagation de surface, pour les deux modèles correspondant le plus étroitement possible aux caractéristiques du trajet réel, puis de choisir celui pour lequel l'affaiblissement de transmission est le moins élevé.
2. Pour chacun des types de trajets décrits au § 2.2.1 calculer l'affaiblissement de la façon suivante:
 - 2.1 *Trajet a)*
Utiliser les informations données au § 3.1 pour 20 % du temps et pour les petits pourcentages de temps.
 - 2.2 *Trajet b)*
Utiliser les informations données dans le § 3.2.1.
 - 2.3 *Trajet c)*
Utiliser les informations données dans le § 3.2.2. pour déterminer l'affaiblissement de transmission pendant 20 % du temps, et les informations données dans le § 3.2.4 pour les petits pourcentages de temps. Utiliser de plus les informations du § 4 et retenir l'affaiblissement le plus faible ainsi obtenu.
 - 2.4 *Trajet d)*
Utiliser les informations données dans les § 3.2.2 et 3.2.4 et retenir l'affaiblissement le plus faible pour 50 % du temps. Calculer alors l'affaiblissement à 20 % pour le mécanisme qui a donné l'affaiblissement le plus faible à 50 %. Pour les faibles pourcentages de temps utiliser les informations du § 4 dans lequel L_{50} représente la valeur de l'affaiblissement à 50 % retenu ci-dessus.
 - 2.5 *Trajet e)*
Procéder comme pour le trajet de type *d)* pour les affaiblissements à 20 % du temps. Pour les faibles pourcentages de temps utiliser les informations du § 3.2.3.

B. Trajets hors du grand cercle (diffusion par les précipitations)

1. Utiliser les données pluviométriques locales ou, lorsqu'elles ne sont pas disponibles, les courbes de la Fig. 9 du Rapport 563 pour déterminer: *a)* la valeur de l'intensité de précipitation en surface dépassée pendant le pourcentage de temps considéré (0,01 % par exemple); *b)* si ce taux s'applique à des pluies « étendues » ou à des pluies d'orage; et *c)* dans ce dernier cas, l'altitude de coupure correspondante.

2. En ce qui concerne la configuration du trajet, déterminer si les faisceaux principaux des antennes des deux stations se coupent ou non et, dans l'affirmative, à quel endroit.
3. Si les faisceaux principaux se coupent, l'affaiblissement de transmission à 4 GHz est donné sur la Fig. 8 pour une pluie d'orage ayant un taux de précipitation de 85 mm/h, le diamètre de la cellule de précipitation étant de 3 km et l'altitude de coupure de 7 km, quel que soit l'emplacement relatif des deux stations.

Si l'altitude de coupure dépasse 7 km, il faut utiliser les données supplémentaires des tableaux IV et V, en prolongeant les altitudes jusqu'à 11 et 15 km respectivement. Si le modèle de pluie « étendue » est applicable, pour une altitude de coupure de 3 km, il faut utiliser les données de la Fig. 7. Les corrections à apporter pour tenir compte d'un taux de précipitation autre que ceux qui sont spécifiés au § 5.1 peuvent être faites selon les indications données au § 5.3. Les corrections à apporter pour tenir compte d'autres diamètres des cellules de précipitation orageuse sont également précisées au § 5.3.

L'évaluation de l'effet de la fréquence est expliquée au § 5.4.

4. En cas de quasi-intersection, l'affaiblissement augmente dans les conditions indiquées au § 5.5. Dans le cas particulier de l'intersection du premier lobe latéral de l'antenne d'une station de Terre et du faisceau principal de l'antenne d'une station terrienne, l'affaiblissement augmente généralement d'environ 16 à 19 dB.
5. L'affaiblissement dû au couplage des lobes latéraux est évalué au § 5.6.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEAN, B.R. et DUTTON, E.J. [1966] Radio meteorology. NBS Monograph No. 92, U.S. Government Printing Office.
C.C.I.R. [1966-1969] Doc. V/68, Modification du Rapport 234-1 (Groupe de travail V-B).
CRANE, R.K. [1974] Bistatic scatter from rain. IEEE Trans., Vol. AP-22.

BIBLIOGRAPHIE

- C.C.I.R. Rapports 234-3 et 563.
MISME, P. [1974] Affaiblissement de transmissions en propagation guidée atmosphérique. *Ann. des télécomm.*, 3-4.

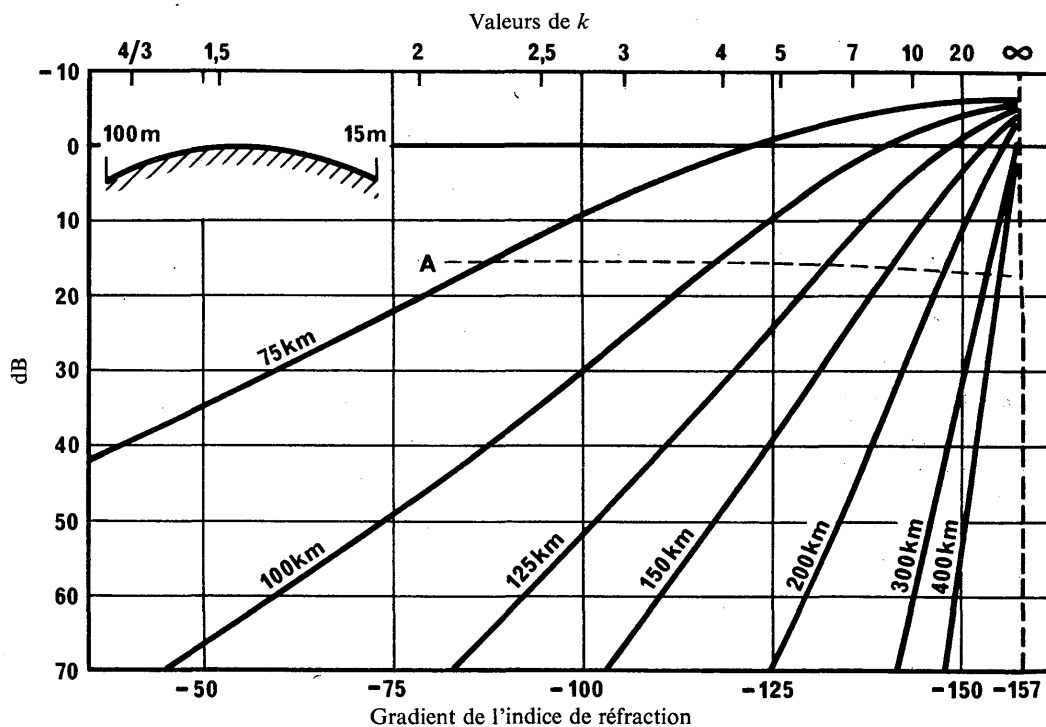


FIGURE 1a

Affaiblissement dû à une diffraction sphérique (4 GHz) en fonction de ΔN

A: Limite de visibilité

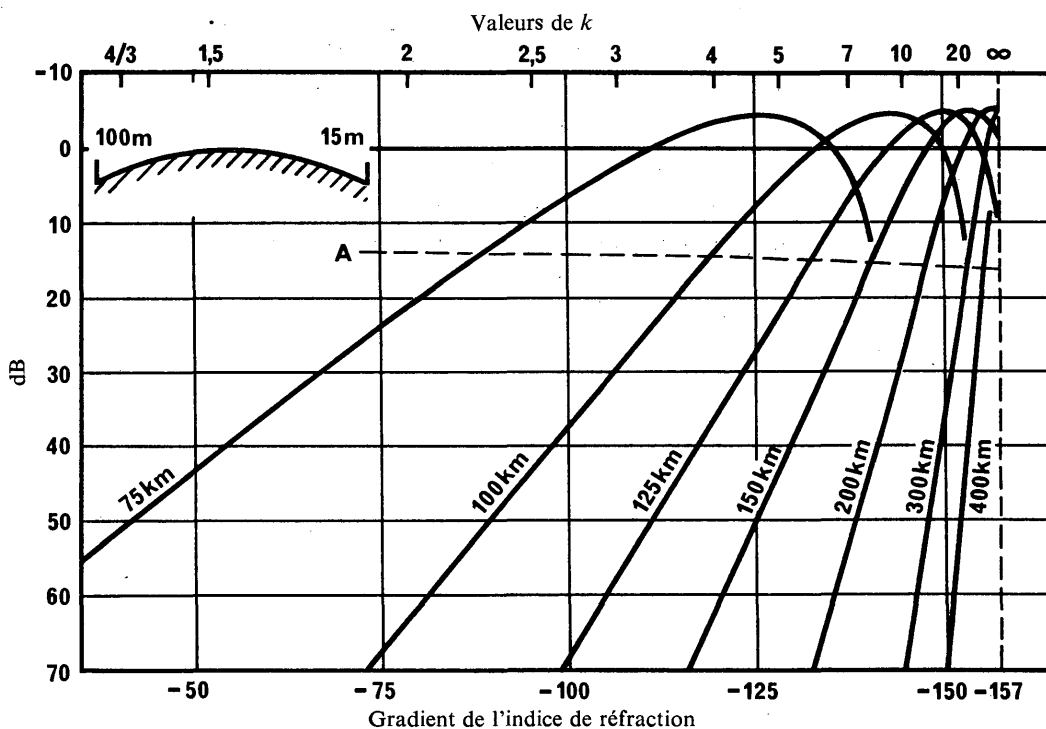


FIGURE 1b

Affaiblissement dû à une diffraction sphérique (12 GHz) en fonction du gradient d'indice

A: Limite de visibilité

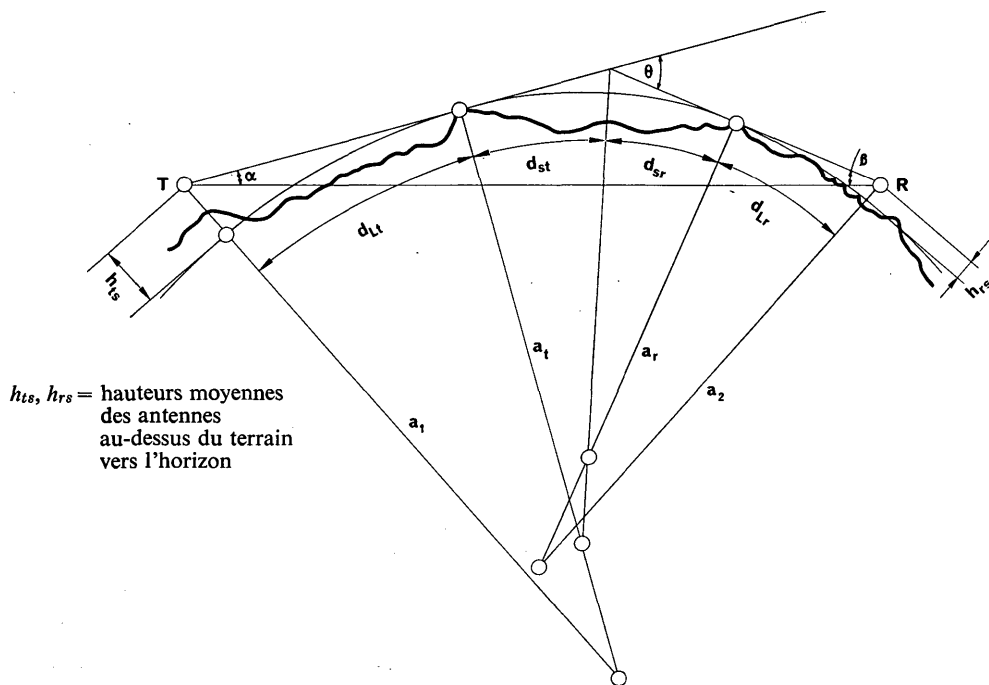


FIGURE 2

Configuration du trajet pour la diffraction

$$\alpha \approx \frac{d}{2a} + \theta_{et} + \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} \quad \beta \approx \frac{d}{2a} + \theta_{er} - \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d}$$

$$\theta_{et} \approx \frac{h_{Lt} - h_{ts}}{d_{Lt}} - \frac{d_{Lt}}{2a} \quad \theta_{er} \approx \frac{h_{Lr} - h_{rs}}{d_{Lr}} - \frac{d_{Lr}}{2a}$$

$$d_{st} = \frac{d\beta}{\theta} - d_{Lt} \quad d_{sr} = \frac{d\alpha}{\theta} - d_{Lr}$$

$$\theta = \frac{d}{a} + \theta_{et} + \theta_{er}$$

$$D_s = d_{st} + d_{sr}$$

$$a_t = D_s d_{st} / (\theta d_{sr}) \quad a_r = D_s d_{sr} / (\theta d_{st})$$

a_1, a_2 = rayons terrestres équivalents aux extrémités du trajet

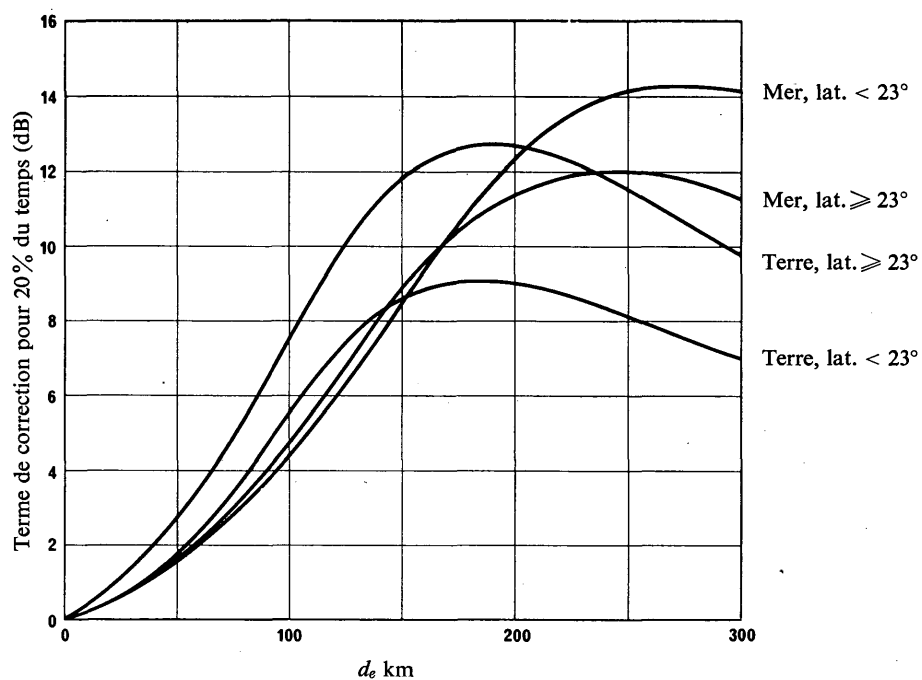


FIGURE 3

Terme de correction pour 20% du temps — Dans les régions climatiques
(à soustraire de la valeur à long terme
de l'affaiblissement de transmission de référence)

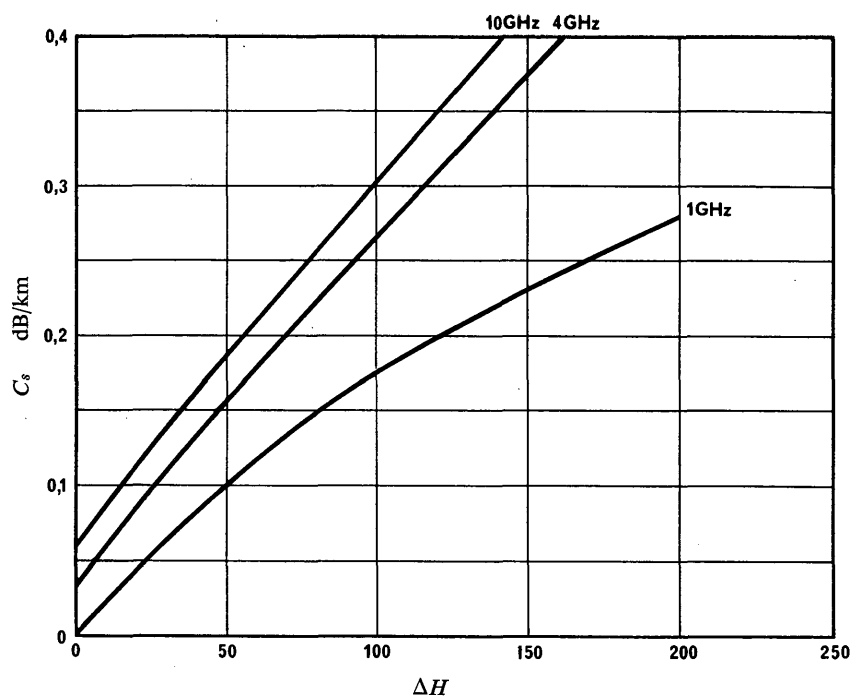


FIGURE 4

Variation de C_s en fonction de ΔH , pour différentes fréquences

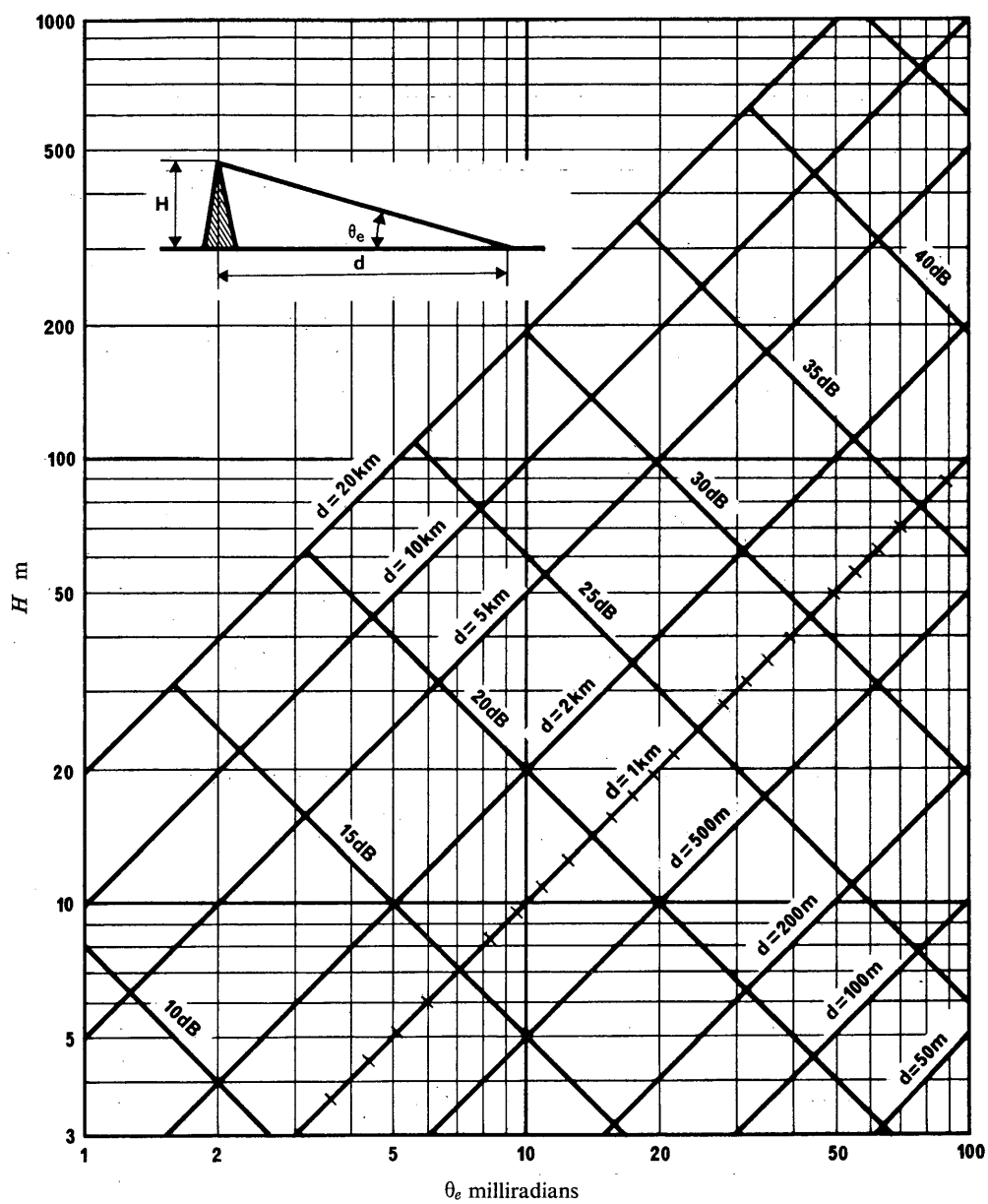


FIGURE 5

Diffraction sur une lame de couteau (4 GHz)

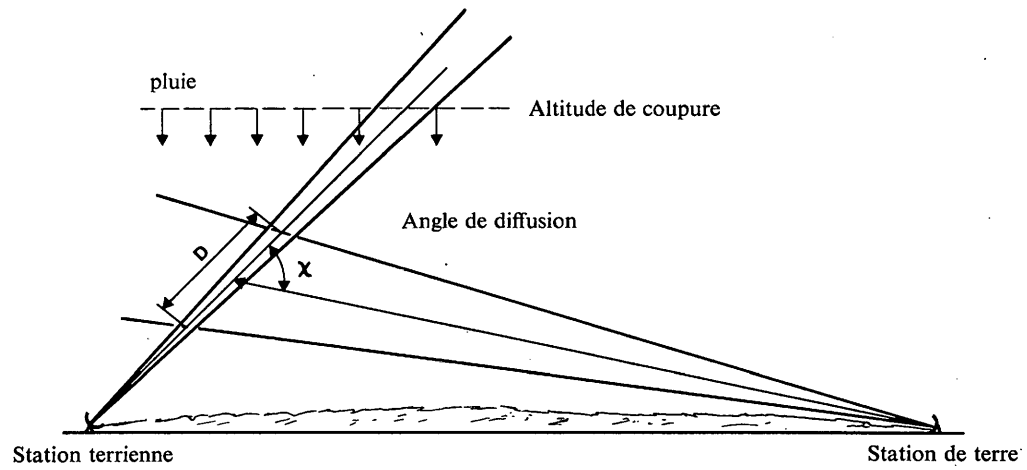


FIGURE 6

Relations géométriques de base pour la diffusion par les précipitations

R 569

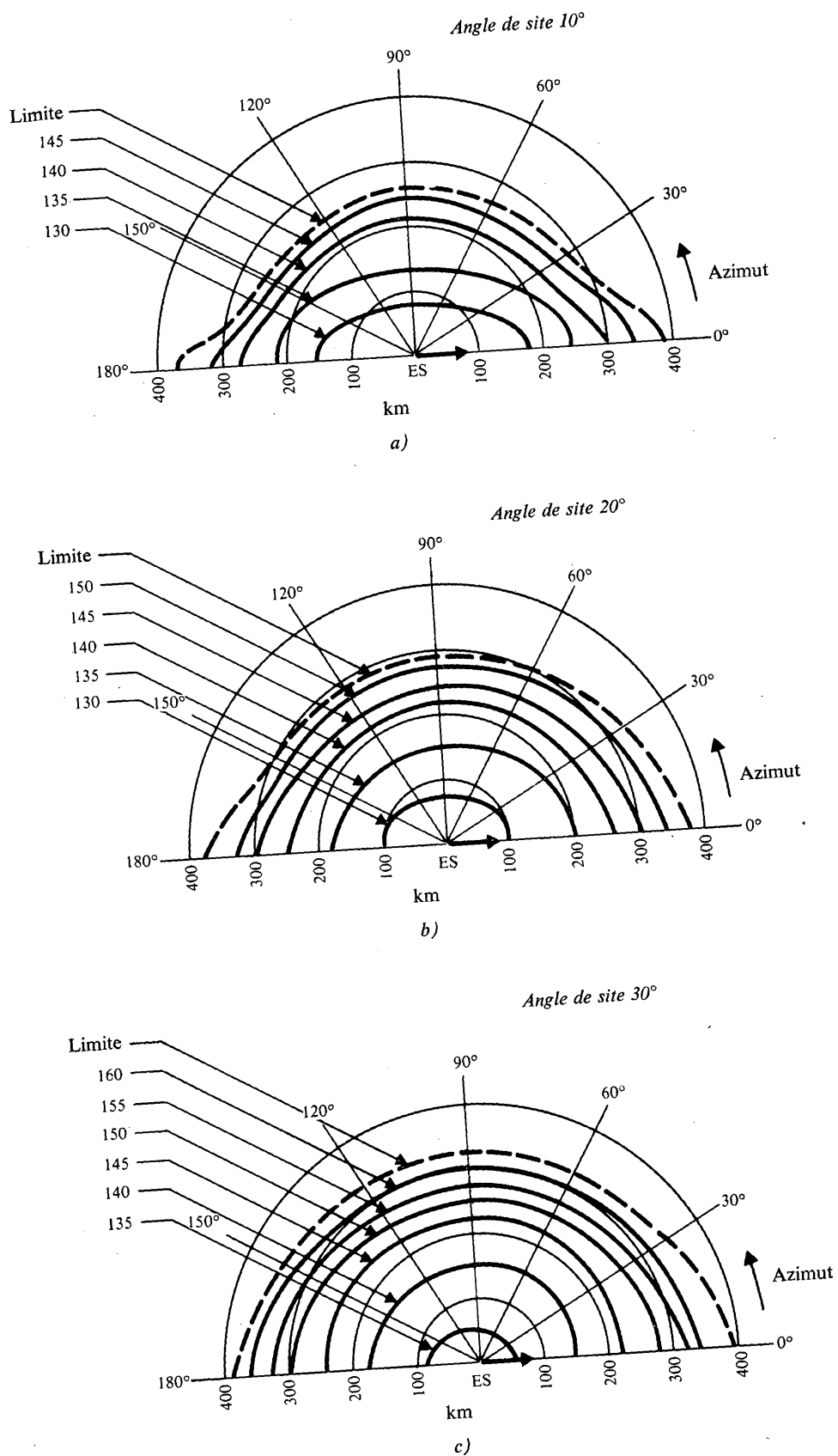


FIGURE 7

Courbes d'affaiblissement de transmission pour les pluies « étendues », $f = 4 \text{ GHz}$
 ES: station terrienne

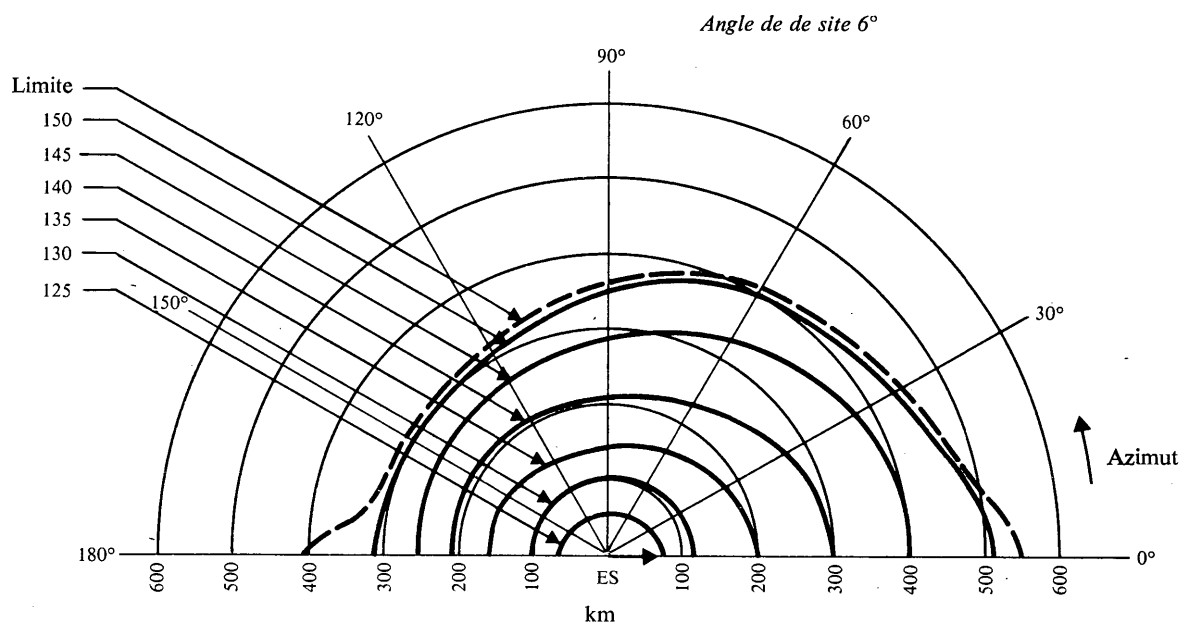


FIGURE 8a

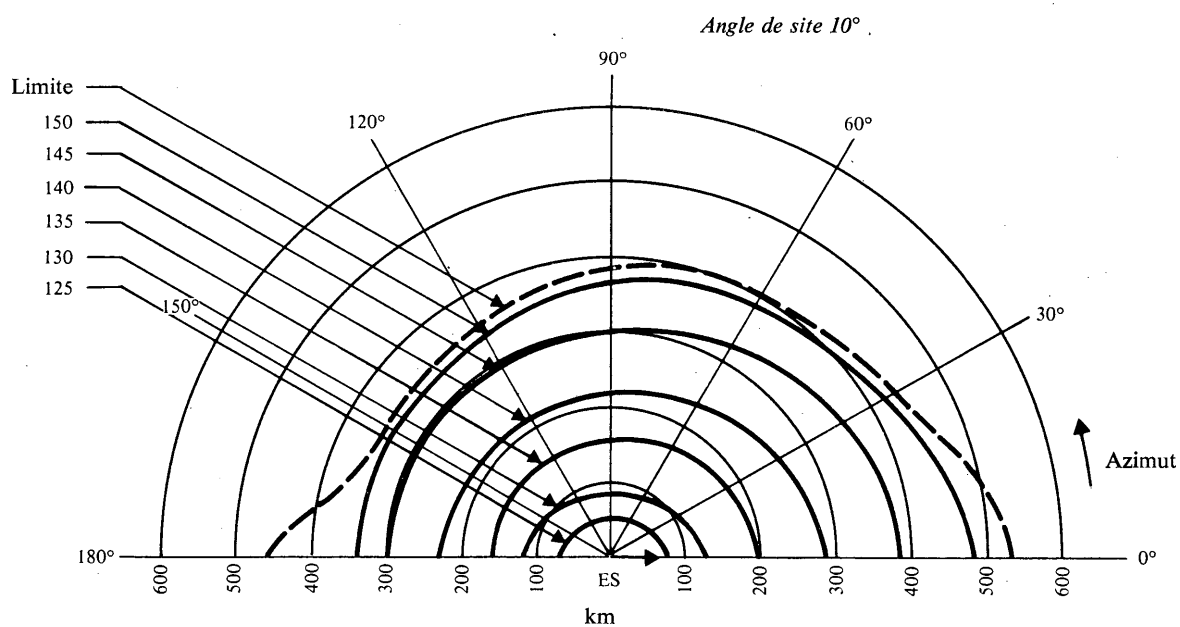


FIGURE 8b

Courbes d'affaiblissement de transmission pour les pluies orageuses, $f = 4$ GHz

ES: station terrienne

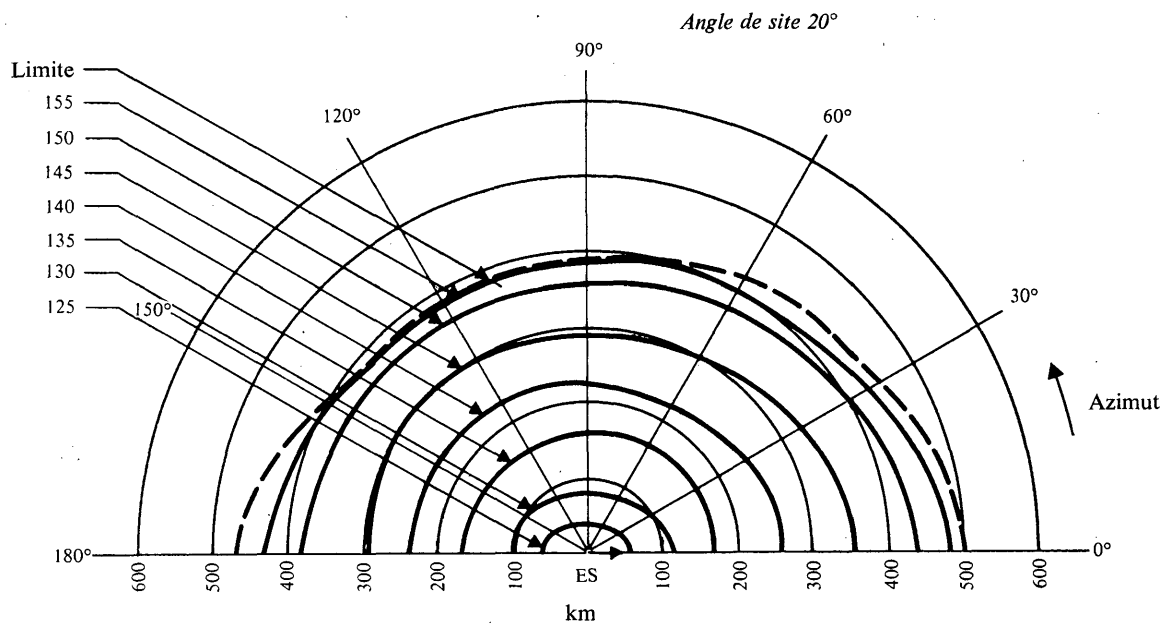


FIGURE 8c

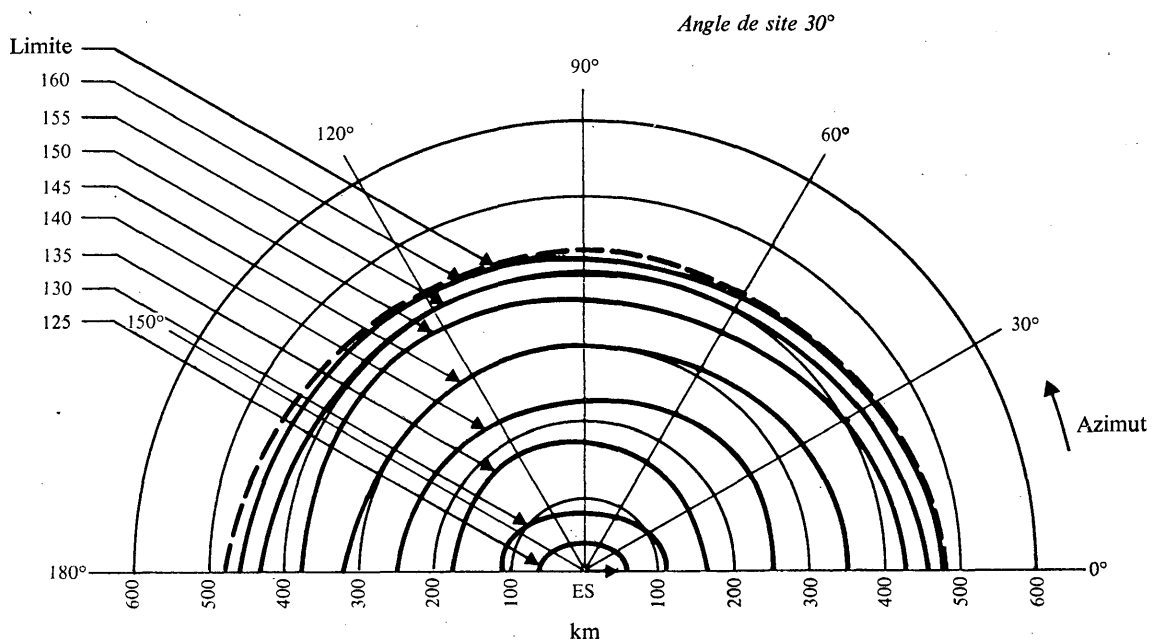


FIGURE 8d

Courbes d'affaiblissement de transmission pour les pluies orageuses, $f = 4$ GHz

ES: station terrienne

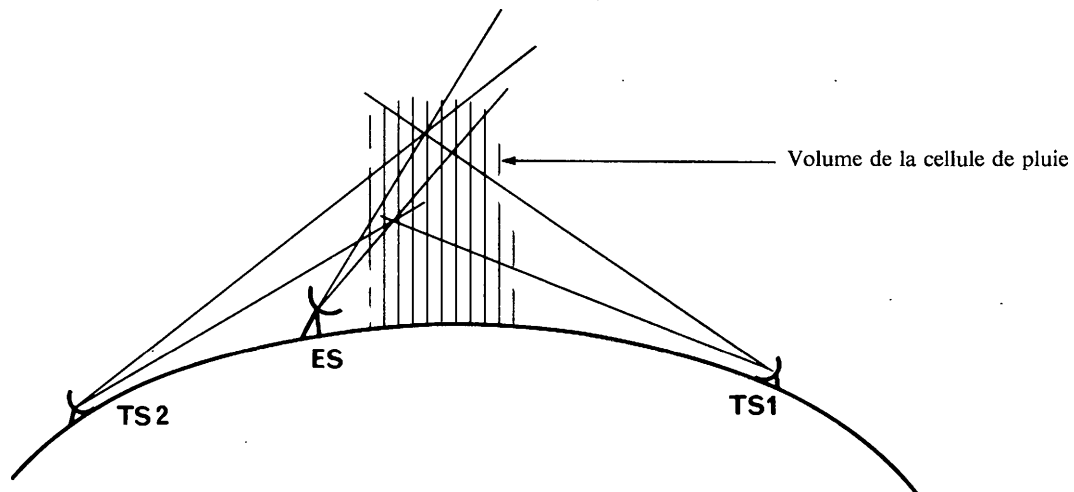


FIGURE 9

Relations géométriques pour l'étude des effets de l'affaiblissement

ES: Station terrienne

TS1, TS2: Station de Terre

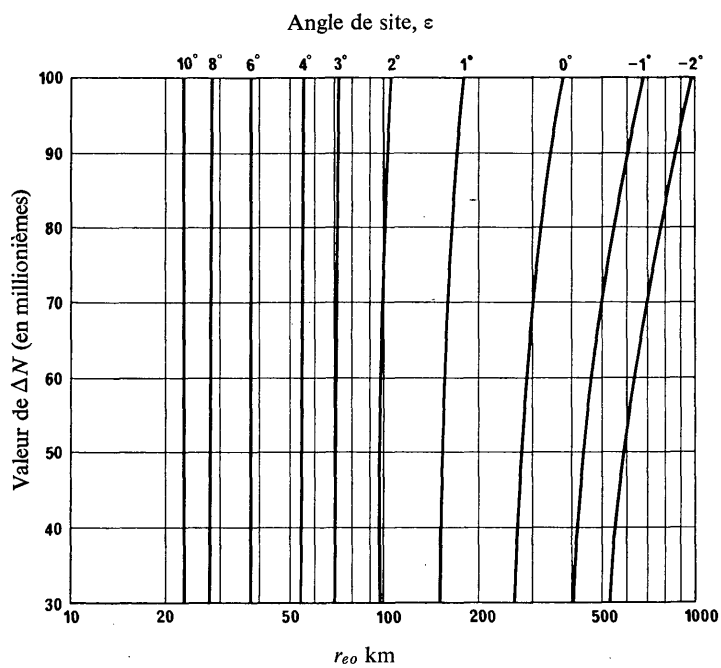


FIGURE 10a

Distance équivalente $r_{éo}$ pour évaluer l'absorption due à l'oxygène

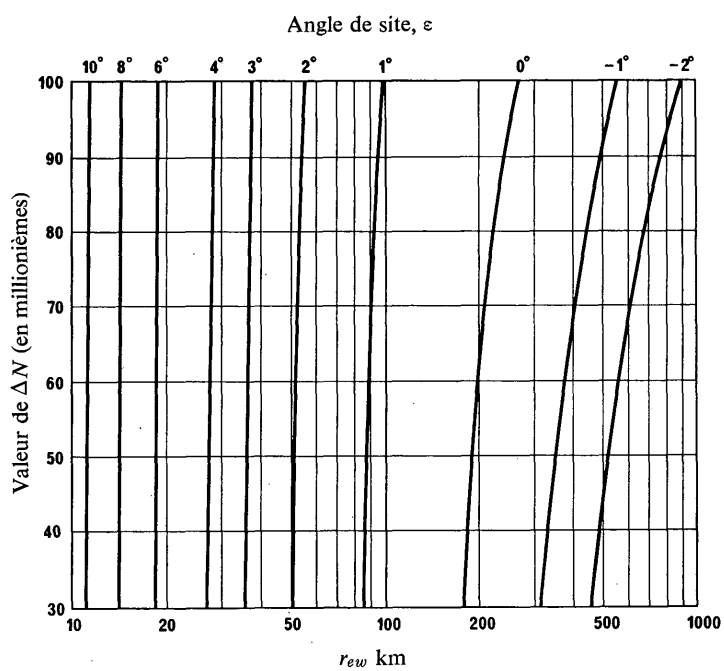


FIGURE 10b

Distance équivalente r_{ew} pour évaluer l'absorption due à la vapeur d'eau

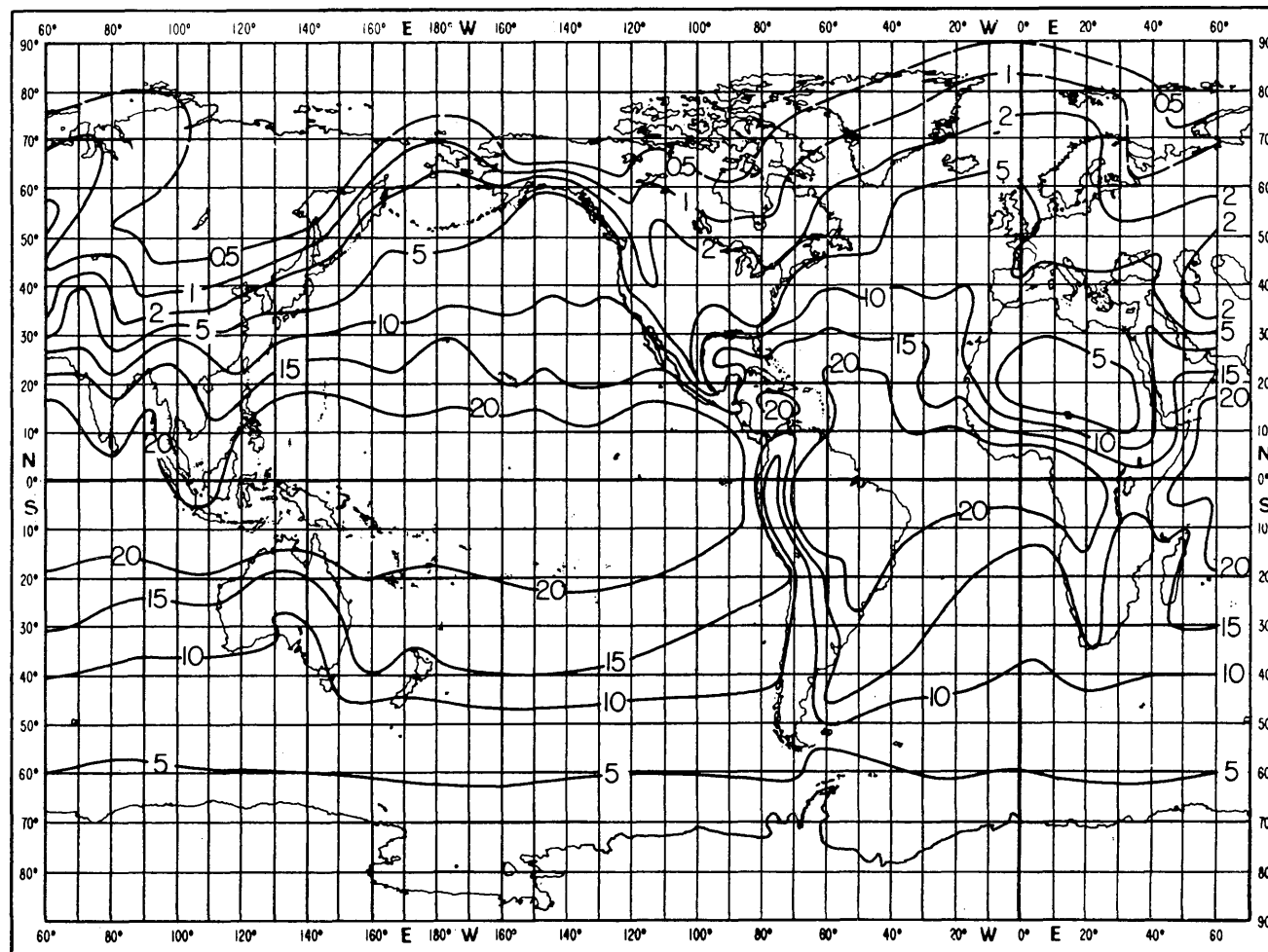


FIGURE 11a

Humidité absolue moyenne (g/m^3), février

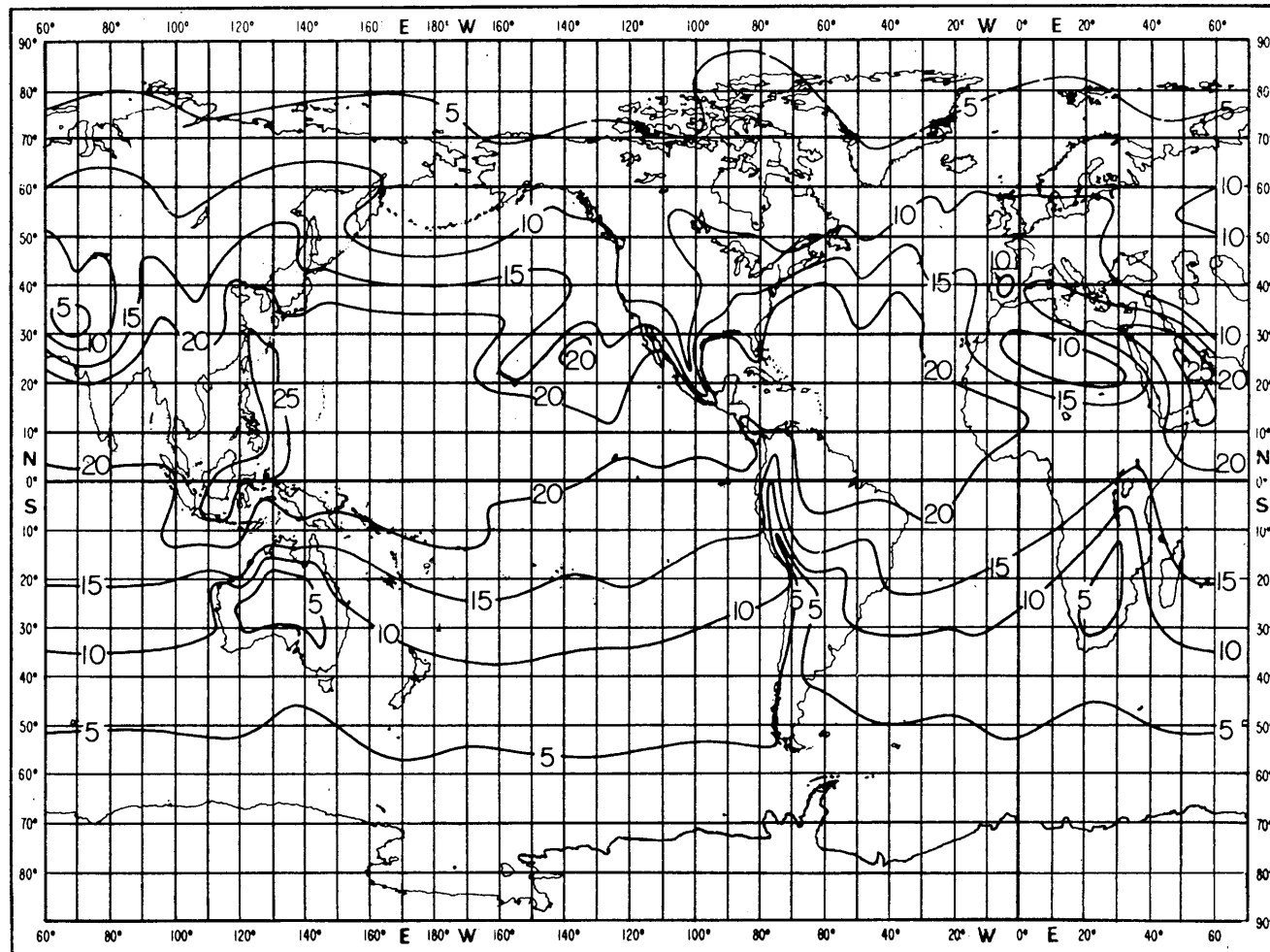


FIGURE 11b

Humidité absolue moyenne (g/m^3), août

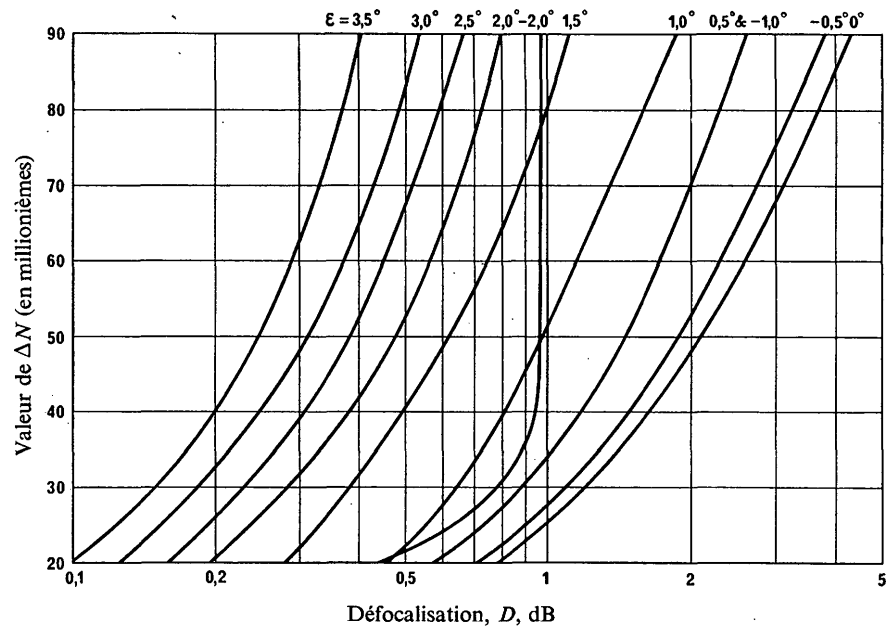


FIGURE 12

Défocalisation des ondes radioélectriques à propagation quasi horizontale

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES, DÉCISIONS, RÉOLUTIONS ET VŒUX

QUESTION 1-2/5

INFLUENCE DU SOL SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

(1965 – 1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que, en ce qui concerne la propagation de l'onde de sol, le problème des variations de phase et d'amplitude résultant de la diversité des valeurs des constantes électriques dans les directions horizontale et verticale, présente une importance toute particulière,
 - pour la détermination des zones de service des émetteurs radioélectriques,
 - pour la précision des aides à la navigation et des équipements radiogoniométriques,
 - pour l'effet de la réfraction côtière lors de l'emploi de ces aides et équipements;
- b) que l'analyse mathématique rigoureuse a été faite jusqu'à présent principalement sur des modèles théoriques, notamment:
 - une ou plusieurs régions de constantes électriques données, dont les séparations sont normales au trajet avec, le cas échéant, des discontinuités en hauteur,
 - stratification horizontale,
 - terre sphérique;
- c) que les accidents de terrain sont d'une importance particulière lorsqu'ils constituent des obstacles dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde considérée,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. comment perfectionner les méthodes de mesure des valeurs de la permittivité ϵ et de la conductivité σ équivalentes pour un trajet, pour des portions d'un trajet ou pour des zones locales, sur plusieurs fréquences;
2. comment obtenir de nouveaux résultats expérimentaux sur l'amplitude et la phase de l'onde de sol du trajet, en liaison notamment avec des mesures simultanées de ϵ et de σ ;
3. comment développer davantage l'étude mathématique afin de tenir compte des variations arbitraires de ϵ et de σ , notamment dans les cas de propagation s'effectuant obliquement par rapport aux séparations et dans les cas de stratification non horizontale et étudier, à cette occasion, les irrégularités de surface et les constantes d'un sol non homogène;
4. comment réduire les méthodes analytiques à une forme qui convienne aux calculs techniques, ou, à titre de variante, comparer les résultats théoriques avec ceux des méthodes semi-empiriques afin de définir plus exactement les limitations de ces dernières;
5. comment examiner de manière plus approfondie la validité de la méthode qui permet de déduire les paramètres équivalents du sol à partir de la dispersion des atmosphériques;
6. quelle est l'influence sur les ondes se propageant au-dessus de la surface terrestre, des variations de facteurs tels que la température, la végétation, le climat ou d'autres causes;

7. quelle est l'influence des accidents de terrain, et notamment celle des obstacles dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde considérée;
8. quelle est l'influence des accidents de terrain sur les caractéristiques de la propagation telles que les évanouissements dans la propagation troposphérique?

PROGRAMME D'ÉTUDES 1A-1/5

**EFFETS DES ACCIDENTS DE TERRAIN SUR LA
PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE**

(1951 – 1953 – 1956 – 1959 – 1963 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est très important de poursuivre les études concernant la propagation des ondes sur un terrain accidenté jusqu'à des fréquences de plusieurs GHz;
- b) que la propagation par-dessus la crête des hautes montagnes présente parfois une grande importance dans la pratique;
- c) que la présence d'obstacles sur le trajet peut modifier, dans une large mesure, la valeur moyenne de l'affaiblissement de transmission, ainsi que l'amplitude et la durée des évanouissements;
- d) que les effets d'écran du terrain ont une grande importance pratique dans les études de brouillage,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. influence de l'existence de plusieurs obstacles sur un même trajet;
 2. influence du rayon de courbure et de la nature du terrain au sommet d'une montagne;
 3. affaiblissement et variation de l'angle d'arrivée imputables à un terrain accidenté et à l'existence de structures conductrices, pour les emplacements situés à l'intérieur de la zone de service et autour d'un émetteur, et pour les points de réception situés à des distances beaucoup plus grandes;
 4. propagation dans des zones urbaines;
 5. effet d'écran produit par des obstacles locaux présents sur le terrain au voisinage d'une station, compte tenu des mécanismes de propagation sur le trajet;
 6. influence du terrain accidenté sur les variations à court terme et à long terme de l'affaiblissement de transmission;
 7. problèmes liés à la polarisation des ondes radioélectriques, lorsqu'elle est influencée par les accidents du terrain au-dessus duquel ces ondes se propagent et par l'existence de structures conductrices au-dessus du terrain;
 8. variations de la phase en fonction de la distance sur un terrain accidenté;
 9. conditions relatives au gain d'obstacle (c'est-à-dire quand le signal reçu sur un trajet montagneux a une plus grande intensité que si le terrain n'était pas accidenté), et variations à court terme et à long terme de l'affaiblissement de transmission dans ces conditions.
-

QUESTION 2-2/5

**INFLUENCE DES RÉGIONS NON IONISÉES DE L'ATMOSPHÈRE
SUR LA PROPAGATION DES ONDES**

Radiométéorologie pour les télécommunications

(1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que la propagation des ondes radioélectriques est fonction des conditions thermodynamiques qui règnent dans l'atmosphère;
- b) que les études de propagation nécessaires à l'établissement d'une liaison radioélectrique, soit de Terre, soit Terre-espace, nécessitent une connaissance du milieu de propagation, c'est-à-dire de l'atmosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu de mettre à l'étude la question suivante:

- 1. quelles sont les méthodes et les instruments les plus appropriés pour l'étude des variations des paramètres thermodynamiques de l'atmosphère qui affectent la propagation des ondes (voir les Notes 1 à 3);
- 2. quelles sont les variations, dans l'espace et dans le temps, de l'indice de réfraction de l'air et de son gradient, notamment dans le sens vertical;
- 3. quelle est l'influence, sur la propagation des ondes, des divers éléments de l'atmosphère tels que la vapeur d'eau, l'oxygène, les nuages, la pluie, la neige, les brouillards, le sable, etc., et en particulier:
 - quelles sont les distributions statistiques et géographiques de ces éléments;
 - quelles sont les caractéristiques de corrélation spatiale et temporelle de chacun de ces éléments;
- 4. quels sont les paramètres radiométéorologiques autres que ceux énumérés ci-dessus qui peuvent être utiles dans la propagation des ondes radioélectriques;
- 5. quelle est la corrélation entre, d'une part, les différents paramètres radiométéorologiques applicables à diverses conditions climatologiques et, d'autre part, les caractéristiques de l'affaiblissement de transmission, exprimées par leur valeur médiane, leur gamme de variation, leur vitesse de variation et la distorsion subie par les signaux?

Note 1. — Les administrations et les exploitations privées sont invitées à fournir des données complémentaires concernant l'indice de réfraction et le gradient vertical, afin de compléter les travaux relatifs à la radio-climatologie mondiale décrits dans le Rapport 233-3, et à vérifier par des mesures nombreuses, fines et précises, les différentes théories avancées pour expliquer la propagation (voir les Notes 2 et 3).

Note 2. — On utilisera le coïndice N défini par la formule donnée dans l'Avis 453.

Note 3. — Pour des études de structure fine, ces mesures doivent être faites avec le maximum possible de précision et de résolution dans le temps et dans l'espace. Il serait également utile d'avoir une connaissance des schémas d'écoulement de l'air, notamment du cisaillement du vent.

QUESTION 3-1/5

**EFFETS DE LA RÉFRACTION TROPOSPHÉRIQUE SUR LES FRÉQUENCES
INFÉRIEURES A 10 MHz**

(1951 – 1953 – 1956 – 1963 – 1966 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que les courbes de propagation de l'onde de sol établies pour les fréquences inférieures à 10 MHz et jointes à l'Avis 368-2 ne tiennent pas compte de la réfraction troposphérique;
- b) que l'on a tenu compte de l'effet de la troposphère dans les Atlas du C.C.I.R. relatifs à la propagation de l'onde de sol sur les fréquences supérieures à 30 MHz, en utilisant un rayon terrestre équivalent égal aux 4/3 du rayon réel;
- c) que l'effet de la réfraction troposphérique décroît au fur et à mesure que la fréquence décroît;
- d) que les données expérimentales et des études mathématiques au sujet de cette question sont décrites dans le Rapport 235-2;
- e) qu'il peut être important de tenir compte de ces effets sur des fréquences nettement inférieures à 10 MHz et pour des liaisons à très grande distance, étant donné l'extension que prennent les aides à la navigation utilisant les techniques de transmission par impulsions dont le degré de précision dépend du mode de propagation de l'onde de sol;
- f) que les modèles mathématiques appropriés de la description de l'indice de réfraction troposphérique en fonction de la hauteur sont indiqués dans le Rapport 563,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles mesures de champ de l'onde de sol (y compris celles mettant en œuvre des techniques de transmission par impulsions) sur un trajet suffisamment long, de conductivité uniforme tel qu'un trajet maritime, sont encore nécessaires pour déterminer expérimentalement les modifications qu'il convient d'apporter aux courbes de l'onde de sol pour tenir compte des effets de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz;
 2. comment faut-il étendre l'analyse mathématique relative à la propagation de l'onde de sol afin de tenir compte des effets de la réfraction troposphérique aux fréquences inférieures à 10 MHz;
 3. quelle est l'influence de la réfraction troposphérique sur la phase de l'onde de sol?
-

QUESTION 5-2/5

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES SYSTÈMES
DE TÉLÉCOMMUNICATION DE TERRE ET SPATIALE**

(1953 – 1956 – 1959 – 1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que la qualité de transmission par faisceau hertzien terrestre, ou par système de télécommunication spatiale, est conditionnée par les caractéristiques de propagation, en particulier pour les valeurs de l'affaiblissement de transmission les plus élevées que l'on peut rencontrer et par les variations temporelles de la fonction de transfert ou de la réponse impulsionnelle du canal de propagation;
- b) que des brouillages entre différents systèmes peuvent occasionnellement se produire par suite d'une propagation anormale, soit sur des trajets Terre-espace, soit sur des trajets transhorizon de Terre,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'étudier la question suivante:

quelles sont les caractéristiques de la propagation à prendre en considération pour établir des systèmes de télécommunication de Terre et des systèmes de télécommunication spatiale, conformes aux Avis du C.C.I.R. en ce qui concerne leurs qualités et les brouillages mutuels?

PROGRAMME D'ÉTUDES 5A-2/5

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES
AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE**

(1963 – 1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

qu'une meilleure connaissance des caractéristiques de propagation est d'une grande importance dans la conception de faisceaux hertziens économiques en visibilité directe et contribue grandement à améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. répartition dans le temps, pour chaque mois de l'année, des valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence (résultant de la propagation par trajets multiples, de la diffraction, de l'absorption, etc.) dans les bandes d'ondes métriques, décimétriques, centimétriques et millimétriques;
2. limitations imposées à la qualité des systèmes, par les effets de la propagation par trajets multiples, ceux de la scintillation et des réflexions sur les bâtiments;

3. variation du découplage de deux polarisations orthogonales, due à la propagation par trajets multiples, aux précipitations ou à toute autre cause;
4. propriétés statistiques des facteurs de propagation qui sont à l'origine des brouillages mutuels entre deux systèmes;
5. influence cumulée des facteurs ci-dessus sur la qualité de fonctionnement globale des faisceaux hertziens à plusieurs sections;
6. mesure dans laquelle les facteurs mentionnés ci-dessus dépendent des conditions de propagation, par exemple la longueur du trajet, le climat, la nature du terrain au-dessus duquel passe le trajet;
7. données sur la propagation nécessaires pour le choix des emplacements des stations, le dégagement des antennes et leurs caractéristiques de rayonnement;
8. caractéristiques de propagation (par exemple, corrélation entre les signaux) que l'on peut utiliser pour améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes.

Note. — La Commission d'études 9 demande en particulier:

- quelle est la valeur de l'affaiblissement de transmission de référence qui n'est pas dépassée pendant 99,998 %, 99,99 %, 99,9 %, 99 %, 80 %, 50 %, 20 %, 1 %, 0,1 %, 0,01 %, et 0,002 % de chaque mois de l'année;
- que l'estimation soit faite de manière telle que l'on puisse en déduire la répartition des valeurs — moyennes sur 5 ms, 1 s, 1 min et 1 h — de la puissance de bruit (dépendant de l'affaiblissement de transmission et de la propagation par trajets multiples) à la sortie d'un système.

Il est reconnu que, dans la pratique, les estimations de l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant les pourcentages du temps inférieurs à 1 % et supérieurs à 99 % sont beaucoup moins dignes de foi que celles valables pour des pourcentages du temps compris entre 1 % et 99 %; néanmoins, il convient de faire des estimations de l'affaiblissement de transmission correspondant à des pourcentages de temps très faibles et très élevés, par exemple 99,9998 %.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5B-1/5

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON

(1963 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire, dans les projets d'un réseau de communication, de définir le fonctionnement d'ensemble du système pendant divers pourcentages donnés du temps;
- b) que l'ingénieur chargé de réaliser des faisceaux hertziens fonctionnant dans les gammes des ondes métriques, décimétriques et centimétriques doit, afin d'assurer le fonctionnement satisfaisant et continu de ces liaisons, connaître les caractéristiques de propagation troposphérique; il en déduit l'affaiblissement de transmission qui n'est pas dépassé pendant un grand pourcentage de temps, pour chaque bande particulière de fréquences, sur la distance correspondant à la portée de service; cette portée peut s'étendre depuis environ 200 km jusqu'à plus de 500 km;

- c) que, pour établir un projet de liaison, on doit connaître les courbes de répartition donnant, en fonction du temps, l'affaiblissement de transmission pour le mois le plus défavorable de la zone climatique considérée;
- d) que, pour les études de brouillage, il est nécessaire de connaître la valeur quasi minimale de l'affaiblissement de transmission;
- e) que la largeur de bande du système peut être limitée par la nature du mode de propagation utilisé,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. répartition dans le temps de l'affaiblissement de transmission de référence (voir l'Avis 341) dans les gammes des ondes métriques, décimétriques et centimétriques, pour chaque mois de l'année (la valeur du gain d'antenne pour le trajet étant spécifiée). L'enregistrement devra être effectué avec un appareil ayant une constante de temps d'une minute (on pourra utiliser d'autres constantes de temps, si cela paraît souhaitable mais, dans tous les cas, il conviendrait de spécifier la valeur de la constante de temps) et on s'intéressera plus spécialement aux valeurs quasi maximales et quasi minimales de l'affaiblissement de transmission ou du champ;
2. pour des pourcentages donnés, niveaux correspondant au mois le plus défavorable, au mois le plus favorable et ceux qui correspondent à l'année entière;
3. heures du jour pendant lesquelles on peut généralement prévoir l'affaiblissement de transmission le plus élevé;
4. la répartition dans le temps des fluctuations de niveau du signal reçu autour de sa valeur médiane horaire (d'autres périodes pourront être utilisées pour définir la valeur médiane, mais il conviendrait de spécifier ces périodes), lorsque l'enregistrement est effectué avec une constante de temps aussi petite que possible;
5. proportion dans laquelle les répartitions dépendent des conditions climatiques de la zone traversée par le trajet considéré et quelles sont les zones de climat particulières qu'il convient de prendre en considération (en raison du peu de renseignements que l'on possède sur la propagation dans des climats autres que le climat tempéré, il est instamment recommandé aux administrations de rassembler les données sur les autres types de climat);
6. proportion dans laquelle les répartitions trouvées dépendent de la fréquence, de la distance entre les stations, de l'angle de site des antennes situées à chaque extrémité et de la nature du terrain au-dessus duquel passe le trajet;
7. mesure dans laquelle ces répartitions peuvent être décrites par des lois statistiques simples;
8. limitations imposées à la largeur de bande du système par le mode de propagation (diffraction, réflexion partielle, diffusion, etc.);
9. limitations imposées au système par le bruit solaire et par le bruit dû à d'autres sources externes.

Note. — Les résultats de ces études devraient être présentés sous la même forme que dans la Circulaire administrative AC/63.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5C-2/5

**DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX SYSTÈMES
DE RADIOCOMMUNICATION SPATIALE**

(1963 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il est nécessaire, dans la conception des systèmes de radiocommunication spatiale, de tenir compte de certains phénomènes qui affectent la propagation des ondes à travers la troposphère;
- b) qu'il importe de connaître les répartitions temporelles de ces phénomènes ainsi que leur variation en fonction de divers facteurs, pour pouvoir déterminer les performances des systèmes ainsi que les brouillages subis ou causés par les stations spatiales,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

- 1. répartition dans le temps de la durée des affaiblissements et des évanouissements, de la réfraction, de la scintillation, de la divergence des faisceaux et de l'absence de cohérence des fronts des ondes radio-électriques qui traversent la troposphère;
 - 2. répartition dans le temps du bruit rayonné par les gaz de l'atmosphère, par les précipitations et par les nuages;
 - 3. mesure dans laquelle ces répartitions dépendent de la fréquence, de l'angle de site, de l'emplacement géographique, du temps et de la composition de l'atmosphère;
 - 4. mise au point de méthodes de prévision de ces répartitions ainsi que de leur dépendance des paramètres ci-dessus;
 - 5. effets cumulatifs de ces phénomènes sur les caractéristiques de qualité des systèmes, y compris les effets de brouillage subi par une station spatiale ou causé par cette station;
 - 6. mesure dans laquelle la diversité d'espace ou d'autres techniques peuvent être utilisées pour venir à bout des difficultés résultant de l'affaiblissement et du bruit dus aux précipitations et aux nuages;
 - 7. limitations imposées par les effets des précipitations et de la propagation par trajets multiples sur la réutilisation des fréquences fondée sur des techniques de polarisation orthogonale.
-

PROGRAMME D'ÉTUDES 5D-2/5

**FACTEURS DE PROPAGATION AFFECTANT LE PARTAGE * DES BANDES
DE FRÉQUENCES RADIOÉLECTRIQUES ENTRE LES SYSTÈMES DE TERRE ET LES
STATIONS TERRIENNES DES SERVICES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE**

(1963 – 1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que, d'après le Règlement des radiocommunications, il convient de déterminer une distance de coordination, ou une zone de coordination, pour les stations terriennes dans les bandes de fréquences partagées entre les services de télécommunication spatiale et les services fixe et mobiles;
- b) que, dans le calcul des distances de coordination, il convient de tenir compte de tous les mécanismes de propagation pouvant intervenir;
- c) que, dans le calcul des brouillages entre les systèmes, il faut tenir compte de façon plus détaillée des mécanismes de propagation qui interviennent;
- d) qu'en vertu des Recommandations Nos Spa2-15 et Spa2-9 de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales (Genève, 1971), le C.C.I.R. est invité à étudier la possibilité d'améliorer et de simplifier la méthode permettant de déterminer la zone de coordination et d'étendre l'application de cette méthode aux fréquences inférieures à 1 GHz et supérieures à 40 GHz,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination d'une méthode appropriée qui permette de tenir compte des facteurs de propagation troposphérique connus, y compris l'absorption et la diffusion provoquées par les précipitations, l'absorption due aux gaz atmosphériques, les réflexions sur les aéronefs et par d'autres phénomènes se produisant sur l'arc de grand cercle et en dehors de cet arc lorsqu'on étudie le champ reçu à l'extrémité de trajets transhorizon (compte tenu également des effets d'écran du terrain), notamment lorsqu'il s'agit du champ dépassé pendant de faibles pourcentages de temps, par exemple 0,005 %, 0,01 %, 0,1 %, 1 % et 20 % d'un mois ou d'une année; on déterminera en particulier dans quelle mesure l'utilisation de la distance angulaire fait entrer automatiquement en ligne de compte l'important affaiblissement de transmission que l'on observe généralement lorsque l'angle d'élévation de l'horizon radioélectrique est grand aux deux extrémités du trajet;
2. détermination des répartitions de l'amplitude des signaux et de la durée des évanouissements sous l'effet de mécanismes de propagation troposphérique tels que la formation de conduits troposphériques, la diffusion provoquée par les précipitations et la diffusion provoquée par les aéronefs, compte tenu des indications suivantes:
 - les répartitions d'amplitude les plus intéressantes sont les répartitions cumulatives des valeurs médianes horaires ** dépassées pendant 0,005 %, 0,01 %, 0,1 %, 1 % et 20 % du temps, pendant des périodes d'une année au moins, et également durant les mois les plus défavorables (signal utile faible ou signal brouilleur fort);
 - les longueurs de trajet les plus intéressantes sont comprises entre 25 et 1000 km; cependant, au-dessus des océans, dans les régions tropicales et équatoriales et dans les régions où le guidage est fréquent, il peut être utile de tenir compte de trajets beaucoup plus longs;

* Les facteurs de propagation qui caractérisent les trajets de brouillage entre le satellite d'un service de télécommunication spatiale et des systèmes de Terre font l'objet du Programme d'études 5C-2/5.

** Il est souhaitable d'utiliser des périodes d'échantillonnage de durée inférieure à une heure pour faciliter la détermination du champ créé pendant de courtes périodes, par exemple 0,005 % du temps. Il est suggéré de considérer une période de 1 minute.

3. possibilité de diviser le monde en grandes zones, pour prendre en considération les effets des différentes conditions climatiques, afin de tenir compte de l'importance relative des divers mécanismes troposphériques;
4. détermination expérimentale des valeurs d'affaiblissement escomptées sur des trajets mixtes (par exemple partiellement sur terre et partiellement sur mer);
5. effet de l'emploi d'antennes à gain élevé si l'on tient compte des cas extrêmes tels que les suivants, qui se produisent lorsqu'il s'agit des services de télécommunication par satellite et de faisceaux hertziens au-dessus de 3 GHz;
 - 5.1 l'antenne de l'une des extrémités du trajet peut être considérée comme ayant un gain soit très voisin de l'unité, soit de l'ordre de 40 dB, son faisceau étant dirigé presque horizontalement dans la direction de l'autre antenne;
 - 5.2 l'antenne de l'autre extrémité du trajet peut avoir un gain de l'ordre de 60 dB, son faisceau étant orienté soit bien au-dessus de l'horizon, soit vers l'autre antenne sous un angle de site d'environ 3° au-dessus de l'horizontale. Les diagrammes de rayonnement des grandes antennes prévues pour les stations terriennes de télécommunication par satellite, à utiliser dans les études de brouillages, sont reproduits dans le Rapport 391-2.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5E-2/5

RÔLE JOUÉ PAR LA DIFFUSION PROVOQUÉE PAR LES PRÉCIPITATIONS DANS LES BROUILLAGES ENTRE SYSTÈMES DE TERRE ET SYSTÈMES TERRE-ESPACE

(1966 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que la pluie, la grêle, la neige, ainsi que certaines hétérogénéités de la structure de l'indice de réfraction de l'atmosphère, sont aptes à diffuser les ondes radioélectriques plus fortement et sous de plus grands angles que ne le font des conditions atmosphériques normales;
- b) que l'étude de ces phénomènes doit être entreprise afin que l'on puisse tenir compte de leurs effets dans le choix de l'emplacement des antennes des stations de faisceaux hertziens qui utilisent en partage des canaux radioélectriques,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination du domaine angulaire et des distances dans lesquels la diffusion provoquée par les précipitations et par certaines hétérogénéités de l'atmosphère peut être considérée comme une source probable de brouillage entre les stations et, en général, de la relation entre ce domaine angulaire et l'angle de diffusion, la distance, la polarisation et la fréquence, pour les fréquences supérieures à 1 GHz;
2. par unité de volume, détermination de la répartition moyenne dans le temps et dans l'espace des valeurs observées de la section efficace de diffusion, en fonction:
 - de la hauteur au-dessus du sol,
 - de l'heure de la journée,
 - de la saison,
 - de la région climatique;

3. recherche éventuellement d'une relation simple entre la section de diffusion et la quantité des précipitations (mm d'eau à l'heure) en cas de chutes de pluie et d'autres formes de précipitations qui provoquent une diffusion notable;
4. méthodes de calcul des brouillages auxquels il y a lieu de s'attendre, notamment dans le cas où les lobes des antennes des stations de faisceaux hertziens ne se coupent pas.

QUESTION 7/5 *

COURBES DE PROPAGATION ET DONNÉES SUR LA PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 30 MHz POUR LE SERVICE DE RADIODIFFUSION, LES SERVICES MOBILES ET LE SERVICE DE RADIOREPÉRAGE

Radiocommunications de Terre et radiocommunications spatiales

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification des services de radiodiffusion, des services mobiles ou du service de radiorepérage dans les bandes de fréquences supérieures à 30 MHz;
- b) que des courbes de propagation peuvent être nécessaires pour déterminer la possibilité technique du partage des fréquences entre d'une part, le service de radiodiffusion, les services mobiles et le service de radiorepérage (radiocommunications de Terre) et, d'autre part, les services de radiocommunication spatiale;
- c) que les courbes de propagation provisoires sur ondes métriques et décimétriques indiquées pour le service de radiodiffusion et pour les services mobiles dans l'Avis 370-2, bien que fondées sur un très grand nombre de résultats de mesures de champ, ne s'appliquent qu'à des climats tempérés;
- d) que les courbes de propagation sur ondes métriques, décimétriques et centimétriques indiquées dans le Rapport 424-1 pour le service mobile aéronautique ne permettent de déterminer que les valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence pour un climat continental tempéré;
- e) l'importance, mentionnée dans le Rapport 425-1, des méthodes fondées sur l'emploi d'ordinateurs pour prévoir le champ dans le cas du service de radiodiffusion et des services mobiles,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. dans quelle mesure le champ ou l'affaiblissement de transmission dépend-il de l'heure, du climat, de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain, des effets de la végétation et des bâtiments et autres constructions;
2. pour chaque service, quelle est la meilleure façon de présenter les réponses au § 1 ci-dessus en vue d'établir des plans de fréquences nationaux et internationaux;
3. quelle est la meilleure façon de présenter les réponses au § 1 ci-dessus lorsqu'il s'agit de faire appel à des ordinateurs pour établir les prévisions de champ?

* Cette Question, ainsi que les Programmes d'études qui en dérivent remplacent le Programme d'études 7A/5 qui est de ce fait annulé.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7B/5

**DONNÉES DE PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LA RADIODIFFUSION
(Y COMPRIS LA RADIODIFFUSION PAR SATELLITE)
DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SITUÉES AU-DESSUS DE 10 GHz**

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que la radiodiffusion sonore et la télévision utiliseront un jour les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz, à partir d'émetteurs de Terre ou de satellites;
- b) que les phénomènes de propagation dans ces bandes auront une influence décisive sur la planification des services de radiodiffusion,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. enregistrement du champ ou de l'affaiblissement de transmission d'émetteurs de Terre ou de satellites pendant des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs années, en autant de régions du monde que possible;
 2. enquêtes sur la distribution statistique du champ (dans le temps et dans l'espace);
 3. dans le cas des émetteurs de Terre, distribution statistique du champ dans le temps en dehors de la zone de service, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de distance;
 4. effets du climat, du terrain et de la végétation, dans le cas des trajets terrestres;
 5. influence des bâtiments, dans le cas des trajets terrestres et spatiaux;
 6. affaiblissement par les gaz de l'atmosphère et par les précipitations (résultats présentés sous forme statistique);
 7. effets de la directivité des antennes;
 8. dans le cas des émetteurs de Terre, hauteur minimale de l'antenne de réception dans les conditions urbaines et rurales;
 9. mise au point de méthodes de calcul électronique de la fiabilité et des brouillages.
-

PROGRAMME D'ÉTUDES 7C/5

**QUESTIONS DE PROPAGATION PRÉSENTANT DE L'IMPORTANCE POUR
LES SERVICES MOBILES UTILISANT DES SYSTÈMES DE
TÉLÉCOMMUNICATION OU DE RADIOREPÉRAGE PAR SATELLITE**

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que diverses administrations étudient des systèmes à satellite pour les besoins de la sécurité, du radio-repérage, des télécommunications et de la gestion du trafic dans les services aéronautique et maritime,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. examen des facteurs de propagation qui influent sur le choix des fréquences pour les systèmes précités, compte tenu du cas où le satellite est voisin de l'horizon;
2. examen des caractéristiques de la réflexion sur la terre et sur la mer ainsi que des évanouissements causés par la propagation par trajets multiples, et de leurs effets sur les signaux de télécommunication ou de radiorepérage transmis par satellites (géostationnaires ou non) à l'usage des aéronefs et des navires.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7D/5

**COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES
DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 MHz ET 1 GHz
POUR LE SERVICE DE RADIODIFFUSION**

(Question 7/5)

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que les courbes de propagation provisoires indiquées dans l'Avis 370-2 reposent sur des données obtenues principalement en Europe et en Amérique du Nord, au moyen d'antennes d'émission et de réception situées généralement à des hauteurs de l'ordre de 300 m et de 10 m respectivement au-dessus du niveau du sol, et qu'il est nécessaire d'obtenir des renseignements, non seulement pour d'autres régions ou zones, mais aussi pour d'autres hauteurs d'antenne,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. enregistrements du champ ou de l'affaiblissement de transmission sur les fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde ayant des conditions climatiques aussi variées que possible, et pour des distances allant jusqu'à environ 1000 km;

2. détermination des additions ou modifications à apporter aux courbes de l'Avis 370-2 pour tenir compte des effets exercés par d'autres conditions de climat, de terrain et de végétation;
3. influence des bâtiments sur la réception à faible hauteur;
4. étude particulière des problèmes posés par les trajets maritimes et par les trajets mixtes terrestres et maritimes;
5. études, pour diverses valeurs de la distance de transmission, de l'effet obtenu lorsqu'on utilise des antennes directives et des antennes dont les faisceaux sont inclinés par rapport au plan horizontal, en considérant notamment l'inclinaison pouvant découler de l'existence d'une ligne d'horizon élevée ou basse;
6. étude de la répartition statistique du champ en fonction de la position du point de réception à l'intérieur d'une zone déterminée;
7. analyses statistiques des résultats fournis par ces expériences, conformément à l'Avis 311-2, afin d'étendre le champ d'application des courbes contenues dans l'Avis 370-2;
8. établissement de méthodes de calcul par ordinateur permettant de calculer le champ ou l'affaiblissement de transmission, en vue de leur application dans la planification des services de radiodiffusion.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7E/5

COURBES DE PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 30 MHz POUR LE SERVICE MOBILE TERRESTRE

(Question 7/5)

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification de services mobiles terrestres aux fréquences comprises entre les limites approximatives de 30 MHz et 10 GHz;
- b) que, bien que l'on dispose à ce sujet d'un grand nombre de résultats de mesure du champ — dont certains ont été incorporés dans l'Avis 370-2 et dans les Rapports 239-3 et 425-1 — ces données intéressent principalement les climats tempérés;
- c) que l'on a besoin, pour la planification des systèmes, de données de propagation plus détaillées se rapportant aux conditions des services mobiles terrestres, en raison notamment du fait que les hauteurs d'antenne ne sont pas les mêmes que dans le service de radiodiffusion,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. enregistrements du champ sur les fréquences comprises entre 30 MHz et 10 GHz, plus particulièrement entre 1 et 10 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde et pour des distances allant de moins de 1 km jusqu'à environ 300 km sur des trajets terrestres et jusqu'à environ 1000 km sur des trajets maritimes. Les distributions de probabilité des emplacements, pour les hauteurs d'antenne considérées, devraient être déduites des

résultats de mesures existants et de nouveaux résultats de mesure. Les hauteurs d'antenne à prendre en considération sont les suivantes: entre 10 m et 600 m au-dessus du sol pour les stations de base et entre 1 m et 10 m au-dessus du sol pour les stations mobiles;

2. établissement de méthodes d'évaluation du champ ou de l'affaiblissement de transmission en vue de la planification des assignations de fréquence pour les services mobiles, aux fréquences comprises entre environ 30 MHz et 10 GHz, compte tenu de l'influence de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain, de la végétation, des bâtiments et du climat, ainsi que de la distribution statistique, temporelle et spatiale, du champ ou de l'affaiblissement de transmission. On considérera plus spécialement les méthodes utilisables avec des ordinateurs. On tiendra compte également de l'éventuelle nécessité d'un partage des fréquences avec des stations des services de télécommunications spatiales.

Note. — Ce Programme d'études se rapporte également aux liaisons radioélectriques avec des hélicoptères.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7F/5

COURBES DE PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES À 30 MHz POUR LES SERVICES MOBILES AÉRONAUTIQUE ET MARITIME ET POUR LE SERVICE DE RADIOREPÉRAGE

(Question 7/5)

(1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification des services mobiles aéronautique ou maritime ou du service de radiorepérage aux fréquences supérieures à 30 MHz;
- b) que, bien que l'on dispose à ce sujet d'un grand nombre de résultats de mesure du champ — dont certains ont été incorporés dans l'Avis 370-2 et dans les Rapports 424-1 et 425-1 — ces données intéressent principalement les climats tempérés,

DÉCIDE À L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. enregistrements du champ sur les fréquences supérieures à 30 MHz, plus particulièrement entre 1,5 et 16 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde et pour des distances allant jusqu'à environ 500 km sur des trajets terrestres et jusqu'à environ 1000 km sur des trajets maritimes. Les hauteurs d'antenne à prendre en considération sont les suivantes: entre 10 m et 1000 m au-dessus du sol pour les stations de base et entre 5 m et 20 000 m au-dessus du sol pour les stations mobiles;
2. établissement de méthodes d'évaluation du champ ou de l'affaiblissement de transmission en vue de la planification des assignations de fréquence pour les services mobile aéronautique, mobile maritime ou de radiorepérage, aux fréquences supérieures à 30 MHz, compte tenu de l'influence de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain et de l'état de la mer, de la végétation, des bâtiments et du climat, ainsi que de la distribution statistique, temporelle et spatiale, du champ ou de l'affaiblissement de transmission. On considérera plus spécialement les méthodes utilisables avec des ordinateurs. On tiendra compte également de l'éventuelle nécessité d'un partage des fréquences avec des stations des services de télécommunications spatiales.

PROGRAMME D'ÉTUDES 8A/5*

**CARACTÉRISTIQUES DE LA PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES
DANS LA RÉGION LA PLUS ÉLEVÉE DU SPECTRE DES FRÉQUENCES
RADIOÉLECTRIQUES, AINSI QUE DANS L'INFRAROUGE ET LA LUMIÈRE VISIBLE**

(1976)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que la Question 53/1 envisage la possibilité d'utiliser des fréquences beaucoup plus élevées que 300 GHz pour les télécommunications,

DÉCIDE qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

étude des facteurs de propagation qui conditionnent la possibilité d'utiliser de telles fréquences pour des systèmes mettant en jeu les transmissions dans l'espace et à travers l'atmosphère.

* Ce Programme d'études dérive de la Question 53/1.

DÉCISION 3
(RÉSOLUTION 45)

PRÉVISION DE LA PHASE ET DE L'AMPLITUDE
DE L'ONDE DE SOL

(1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il y a lieu d'élaborer de meilleures méthodes de prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol propagée au-dessus de la Terre (voir les Questions 1-2/5 et 3-1/5);
- b) que l'influence de la réfraction troposphérique présente de l'importance dans les prévisions de la phase (instant d'arrivée) des signaux qu'utilisent les systèmes de radiolocalisation de grande précision,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

- 1. qu'on doit maintenir le Groupe de travail intérimaire 5/1 chargé d'examiner l'application pratique des données météorologiques, topographiques et géologiques à la prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol spécialement aux fréquences inférieures à 30 MHz environ, qui se propagent au-dessus de la surface de la Terre et dans les régions non ionisées de l'atmosphère;
- 2. que ce Groupe devra proposer d'apporter au Rapport 235-2, à l'Avis 368-2 et à l'Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol publié par le C.C.I.R., les révisions, amendements et compléments qui lui paraîtront nécessaires;
- 3. qu'il devra rédiger un nouveau Rapport sur la propagation au-dessus d'une Terre non homogène, pour remplacer le Rapport 230-1 (New Delhi, 1970) qui a été annulé;
- 4. qu'il sera composé de membres désignés par les Administrations des pays suivants: Etats-Unis d'Amérique, Royaume-Uni, Suède, France et Norvège;
- 5. que ses travaux seront coordonnés par un représentant désigné par l'Administration de la Suède;
- 6. qu'il collaborera, pour l'étude des questions qui les intéressent tous deux, avec le Groupe de travail intérimaire 5/3 institué aux termes de la Décision 5.

DÉCISION 4
(RÉSOLUTION 2-1)

**DONNÉES RELATIVES A LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE
POUR LA RADIODIFFUSION, LES TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES
ET LES LIAISONS ENTRE POINTS FIXES**

(1963 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) que les données relatives à la propagation, pour l'établissement des services de radiodiffusion (notamment de radiodiffusion par satellite) et des services mobiles, doivent être tenues à jour;
- b) qu'il est également nécessaire de connaître les facteurs de propagation troposphérique affectant la conception des systèmes de faisceaux hertziens et le partage des bandes de fréquences entre ces derniers, ainsi qu'entre les systèmes de télécommunication spatiale et de Terre (voir le Programme d'études 5D-2/5),

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

- 1. que le Groupe de travail intérimaire 5/2 doit poursuivre l'étude de toutes les méthodes permettant de déterminer, avec autant d'exactitude et de concision que possible, et sous une forme qui permette aux ingénieurs des radiocommunications d'appliquer aisément ces méthodes, l'affaiblissement de transmission pour les systèmes de télécommunication entre points fixes, les services de radiodiffusion et les services mobiles, en tenant compte de la nécessité de déterminer les caractéristiques de fiabilité de ces systèmes et leur vulnérabilité au brouillage;
 - 2. que ce Groupe de travail proposera toutes révisions de l'Avis 370-2, des Rapports 238-2, 239-3, 338-2, 424-1, 425-1, 564 et 569 qui lui paraîtront souhaitables;
 - 3. que ce Groupe se compose de membres désignés par les Administrations des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, de l'Italie, du Japon, des Pays-Bas, de la République Fédérale d'Allemagne, du Royaume-Uni, de la Suède, de l'U.R.S.S., ainsi que de l'I.F.R.B., et que la coordination de ses travaux soit confiée au représentant du Royaume-Uni;
 - 4. que ce Groupe travaille en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire créé en application de la Décision 5;
 - 5. qu'autant que possible, le travail de ce Groupe soit fait par correspondance;
 - 6. que ce Groupe présente les rapports appropriés avant les Assemblées plénières du C.C.I.R.
-

DÉCISION 5
(RÉSOLUTION 3-1)

INFLUENCE DES RÉGIONS NON IONISÉES DE L'ATMOSPHÈRE
SUR LA PROPAGATION DES ONDES

(1963 – 1970 – 1974)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

- a) qu'il convient de tenir à jour les données présentées dans les Rapports 233-3, 234-3 et 563 en tenant compte de nouveaux résultats expérimentaux;
- b) qu'il est nécessaire d'examiner l'utilité que peuvent présenter d'autres paramètres (voir la Question 2-2/5) pour les études de radiométéorologie dans divers climats;
- c) qu'il est nécessaire, pour l'établissement des systèmes de télécommunication spatiale, de connaître les caractéristiques de l'absorption, de la réfraction et du bruit céleste (voir le Programme d'études 5A-2/5),

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

- 1. que le Groupe de travail intérimaire 5/3 doit poursuivre l'examen de toutes les données météorologiques pouvant intéresser la propagation des ondes radioélectriques dans les régions non ionisées de l'atmosphère;
 - 2. que ce Groupe est chargé de proposer toute révision des Rapports 233-3, 234-3 et 563 qui lui apparaîtra souhaitable;
 - 3. que ce Groupe sera composé de membres désignés par les Administrations du Canada, des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, de l'Italie, du Japon, des Pays-Bas, de la République Fédérale d'Allemagne, du Royaume-Uni, de la Suède et de l'U.R.S.S., et que la coordination de ses travaux continuera à être confiée au membre désigné par l'Administration française;
 - 4. que ce Groupe doit travailler en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire institué aux termes des dispositions de la Décision 4;
 - 5. que, dans toute la mesure du possible, les travaux du Groupe doivent s'effectuer par correspondance;
 - 6. que ce Groupe doit établir, avant la XIVe Assemblée plénière du C.C.I.R., un rapport traitant plus particulièrement de l'affaiblissement par les précipitations.
-

