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

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

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

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

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

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

© International Telecommunication Union

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS

C.C.I.R.

XII[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE

NEW DELHI, 1970

VOLUME II

PARTIE 1

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

Publié par

L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

GENÈVE, 1970

COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS

C.C.I.R.

XII[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE

NEW DELHI, 1970

VOLUME II

PARTIE 1

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

Publié par

L'UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

GENÈVE, 1970

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

PROPAGATION

DANS LES

MILIEUX

NON IONISÉS

AVIS ET RAPPORTS

5A Propagation, prévisions et courbes, problèmes d'interférences

5B Radiométéorologie

5C Effets dus au terrain

5D Propagation par l'onde de sol

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES
RÉSOLUTIONS ET VŒUX

(Commission d'études 5)

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

RÉPARTITION DES TEXTES DE LA XII[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R. PARMI LES VOLUMES I A VII

Les Volumes I à VII, XII[e] Assemblée plénière, contiennent tous les textes du C.C.I.R. actuellement en vigueur.

1. Avis, Rapports, Résolutions, 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.

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.

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 VII.

1.2 *Avis*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
45	VI	265, 266	V	374-376	III
48, 49	V	268	IV	377-379	I
77	VI	270	IV	380-393	IV
80	V	275, 276	IV	395-406	IV
100	I	279	IV	407-421	V
106	III	283	IV	422, 423	VI
139, 140	V	289, 290	IV	427-429	VI
162	III	302	IV	430, 431	III
166	I	304-306	IV	432, 433	I
182	I	310, 311	II	434, 435	II
205	V	313	II	436	III
214-216	V	314	IV	439-441	VI
218, 219	VI	325-334	I	442, 443	I
224	VI	335-340	III	444-446	IV
237	I	341	I	447-451	V
239	I	342-349	III	452, 453	II
240	III	352-359	IV	454-461	III
246	III	361	VI	462-466	IV
257, 258	VI	362-367	IV	467-474	V
262	V	368-373	II	475-478	VI

1.3 *Rapports*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
19	III	226	IV	341-344	II
32	V	227-231	II	345-357	III
42	III	233-236	II	358, 359	VI
79	V	238, 239	II	361	VI
93	VI	241	II	362-364	III
106, 107	III	244-251	II	366	III
109	III	252	(1)	367-373	I
111	III	253-256	II	374-393	IV
112	I	258-266	II	394	VI
122	V	267	III	395-397	IV
130-137	IV	269-271	III	398-401	V
176-194	I	272, 273	I	403-407	V
195	III	275-282	I	409-412	V
196	I	283-290	IV	413-415	(1)
197, 198	III	292-294	V	416-423	I
200, 201	III	297-308	V	424-432	II
202	I	311-316	V	433-439	III
203	III	318-320	VI	440	(1)
204-214	IV	321	III	441	III
215	V	322	(1)	442-456	IV
216	VI	324-334	I	457-498	V
218, 219	IV	335	III	499-515	VI
222-224	IV	336-339	II	516	V
		340	(1)		

(1) Publiés séparément.

1.4 *Résolutions*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2-4	II	21-23	III	39, 40	VII
7, 8	II	24	VII	41-44	I
10	II	26, 27	VII	45-51	II
12, 13	II	30	II	52-54	III
14	III	33	VII	55, 56	IV
15, 16	I	36, 37	VII	57, 58	V
20	VI	38	V, VII		

1.5 *Vœux*

Numéro	Volume	Numéro	Volume	Numéro	Volume
2	I	22, 23	II	32-35	I
11	I	24	VI	36, 37	III
13, 14	IV	26-28	III	38-41	V
15, 16	V	29, 30	I	42, 43	VI

2. Questions et Programmes d'études

2.1 *Indication 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. Par exemple:

— 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 Programme d'études qui dérive de la Question 1/10;

— Programme d'études 3-1A/10: première version du Programme d'études qui dérive de la Question révisée 3-1/10;

— Programme d'études 3-1B-1/10: première révision du deuxième Programme d'études qui dérive de la Question révisée 3-1/10.

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.

Ainsi, le numéro de la Question correspondant à sa révision la plus récente est utilisé pour la composition du numéro du Programme d'études. Ceci facilite la consultation des Volumes, mais n'exclut pas la possibilité, pour le Programme d'études, d'avoir été élaboré avant la plus récente révision de la Question.

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 VII DE LA XII[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R.

(New Delhi, 1970)

VOLUME I	Utilisation du spectre, contrôle des émissions (Commission d'études 1).
VOLUME II (Partie 1)	Propagation dans les milieux non ionisés (Commission d'études 5).
VOLUME II (Partie 2)	Propagation ionosphérique (Commission d'études 6).
VOLUME III	Service fixe fonctionnant sur des fréquences inférieures à 30 MHz environ (Commission d'études 3). Fréquences étalon et signaux horaires (Commission d'études 7). Vocabulaire (CIV).
VOLUME IV (Partie 1)	Service fixe utilisant les systèmes de faisceaux hertziens (Commission d'études 9). Coordination et partage de fréquences entre les systèmes de télécommunication par satellite et les faisceaux hertziens terrestres (sujets communs aux Commissions d'études 4 et 9).
VOLUME IV (Partie 2)	Service fixe utilisant des satellites de télécommunication (Commission d'études 4). Recherche spatiale et radioastronomie (Commission d'études 2).
VOLUME V (Partie 1)	Service de radiodiffusion (sonore) (Commission d'études 10). Problèmes communs à la radiodiffusion sonore et à la télévision (sujets communs aux Commissions d'études 10 et 11).
VOLUME V (Partie 2)	Service de radiodiffusion (Télévision) (Commission d'études 11). Transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision sur une grande distance (CMTT).
VOLUME VI	Service mobile (Commission d'études 8).
VOLUME VII	Renseignements relatifs à la XII[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 II

PARTIE 1

INDEX *

PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

(Commission d'études 5)

		Page
Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 5		13
SECTION 5 A:	Propagation, prévisions et courbes, problèmes d'interférences	17
SECTION 5 B:	Radiométéorologie	149
SECTION 5 C:	Effets dus au terrain	195
SECTION 5 D:	Propagation par l'onde de sol	217

AVIS		Section	
AVIS 310-2	Définitions de termes se rapportant à la propagation dans la troposphère	5 B	149
AVIS 311-1	Mode de présentation des données obtenues au cours de l'étude de la propagation troposphérique. *Radiodiffusion et télévision*	5 A	17
AVIS 368-1	Courbes de propagation pour l'onde de sol aux fréquences comprises entre 10 kHz et 10 MHz	5 D	217
AVIS 369-1	Définition d'une atmosphère fondamentale de référence	5 B	152
AVIS 370-1	Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz. *Radiodiffusion et services mobiles*	5 A	20
AVIS 452	Considérations relatives à la propagation pour évaluer les brouillages entre services spatiaux et services de terre fonctionnant dans une même voie	5 A	41
AVIS 453	Formule donnant l'indice de réfraction radioélectrique	5 B	152

RAPPORTS			
Rapport 227	Mesure du champ, de la densité du flux de puissance, de la puissance rayonnée, de la puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception et de l'affaiblissement de transmission	5 A	42
Rapport 228-1	Mesure du champ pour les services de radiodiffusion y compris la télévision sur ondes métriques et décimétriques	5 A	53
Rapport 229-1	Détermination des caractéristiques électriques de la surface de la Terre	5 C	195
Rapport 230-1	Propagation des ondes sur terrain non homogène	5 C	201

* 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 231-2	Atmosphères de référence	5 B	153
Rapport 233-2	Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes. *Propagation sol-sol*	5 B	155
Rapport 234-2	Influence de la réfraction et de l'absorption troposphériques sur les systèmes de télécommunication spatiale. *Propagation Terre-espace*	5 B	169
Rapport 235-1	Effets de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz	5 D	224
Rapport 236-2	Influence des accidents de terrain sur la propagation troposphérique	5 C	206
Rapport 238-1	Données sur la propagation nécessaires pour les faisceaux hertziens trans-horizon	5 A	65
Rapport 239-2	Résultats statistiques relatifs à la propagation dans le service de radiodiffusion et dans le service mobile dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz	5 A	70
Rapport 241-1	Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens. *Collecte de données*	5 A	87
Rapport 244-2	Estimation de l'affaiblissement de transmission de l'onde troposphérique	5 A	87
Rapport 336	Utilisation des fréquences dans la région située au-dessus de l'ionosphère et sur la face cachée de la Lune	5 A	113
Rapport 337-1	Facteurs de propagation dont dépend le partage des bandes de fréquences entre systèmes spatiaux et faisceaux hertziens de Terre	5 A	114
Rapport 338-1	Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe	5 A	114
Rapport 339-1	Influence de la diffusion par les précipitations sur le choix de l'emplacement des stations terrestres	5 B	182
Rapport 424	Courbes de propagation sur ondes métriques, décimétriques et centimétriques pour le service mobile aéronautique	5 A	128
Rapport 425	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*	5 A	135
Rapport 426	Méthodes de prévision du bruit radioélectrique, de l'absorption et de la réfraction des ondes dans les systèmes de télécommunication spatiale. *Rassemblement de données*	5 B	193
Rapport 427	Facteur d'écran du terrain à utiliser dans le calcul de la distance de coordination	5 C	211
Rapport 428	Calcul à l'ordinateur de courbes de propagation de l'onde de sol	5 D	226

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES

Question 1-1/5	Propagation sur terrain non homogène et accidenté	229
Programme d'études 1-1A/5	Effets des accidents de terrain sur la propagation troposphérique	230
Question 2-1/5	Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes. *Radiométéorologie pour les télécommunications*	231
Question 3/5	Effets de la réfraction troposphérique sur les fréquences inférieures à 10 MHz	233
Question 5-1/5	Données sur la propagation nécessaires pour les systèmes de télécommunication de Terre et spatiale	234

Page

Programme d'études 5-1A-1/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe 234

Programme d'études 5-1B-1/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens transhorizon 235

Programme d'études 5-1C-1/5 Absorption et réfraction troposphériques dans les systèmes de radiocommunication spatiale 237

Programme d'études 5-1D-1/5 Facteurs de propagation affectant le partage des bandes de fréquences radioélectriques entre les systèmes spatiaux et les systèmes de faisceaux hertziens 238

Programme d'études 5-1E-1/5 Influence de la diffusion provoquée par les précipitations sur le choix des emplacements des stations terriennes 239

Programme d'études 5-1F-1/5 Facteur d'écran du terrain à utiliser pour le calcul de la distance de coordination 240

Programme d'études 7A/5 Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz. *Radiodiffusion et services mobiles* 241

Question 8/5 Données de propagation pour la radiodiffusion sonore et la télévision dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz 242

Question 9/5 Considérations relatives à la propagation qui affectent les services mobiles utilisant les systèmes de télécommunication ou de radiorepérage par satellite 243

RÉSOLUTIONS

Résolution 2-1 Données relatives à la propagation troposphérique pour la radiodiffusion, les télécommunications spatiales et les liaisons entre points fixes 243

Résolution 3-1 Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes . 244

Résolution 45 Prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol 245

Résolution 46 Publication d'un Atlas des coefficients de réflexion 246

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. KALININE (U.R.S.S.)

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

La Commission d'études 5 du C.C.I.R. succède à l'ancienne Commission d'études V; le changement de désignation résulte du réaménagement des Commissions d'études qui a été approuvé par la XII[e] Assemblée plénière à New Delhi, en 1970. En fait, ce réaménagement n'a pas affecté très profondément la Commission d'études V; on verra que tous les textes de la Commission d'études V à New Delhi sont maintenant attribués à la Commission d'études 5.

La Commission d'études V a tenu deux réunions entre la XI[e] Assemblée plénière (Oslo, 1966) et la XII[e] Assemblée plénière (New Delhi, 1970). Il s'agit d'une Réunion intérimaire à Boulder, Colorado, en 1968, et d'une Réunion finale à Genève en 1969.

Le Dr R. L. Smith-Rose (Royaume-Uni) s'est démis de ses fonctions de Rapporteur principal de la Commission d'études lors de l'Assemblée plénière de New Delhi, après avoir dirigé les travaux de la Commission depuis sa création en 1948. Le caractère global des activités de la Commission d'études doit beaucoup à l'influence du Dr Smith-Rose.

1. Portée des travaux de la Commission d'études

La Commission d'études doit continuer à apporter sa contribution à une meilleure compréhension de la propagation de l'onde de sol — ce qui implique des études de propagation sur les fréquences inférieures à 30 MHz — mais elle porte maintenant l'essentiel de son analyse sur les effets troposphériques et les effets de terrain aux fréquences supérieures à 30 MHz. Ces recherches ont une importance fondamentale en ce qui concerne le développement des services de télécommunication de Terre et par satellite, et elles sont essentielles pour la détermination des critères régissant le partage des fréquences entre ces services. De ce fait, les Avis et Rapports de la Commission d'études qui ont été approuvés par l'Assemblée plénière de New Delhi constituent une contribution importante aux données de base requises par la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales qui doit se réunir en 1971.

La portée des études en cours et les résultats fournis par les recherches déjà effectuées sont présentés d'une manière détaillée dans les paragraphes qui suivent.

2. Quelques problèmes d'importance particulière

Certaines des études envisagées se rapportent plus spécialement aux services de Terre tandis que d'autres intéressent avant tout les services spatiaux; néanmoins, beaucoup de ces études présentent en fait de l'importance pour ces deux catégories de services, notamment en ce qui concerne leur coexistence.

Il existe des Avis qui se rapportent aux services de radiodiffusion et au service mobile terrestre, pour lesquels des améliorations sont possibles à la lumière des résultats les plus récents. Il convient de poursuivre les études en ce qui concerne le service mobile aéronautique, pour lequel la Commission a néanmoins établi un Rapport qui contient des indications utiles.

On s'est livré à des études approfondies concernant l'affaiblissement de transmission sur les trajets de Terre entre points fixes. Il n'a pas encore été possible d'établir le texte d'un Avis décrivant une méthode préférée, mais le Rapport 244-2 spécifie plusieurs méthodes qui peuvent être employées dans des contextes différents.

Les études doivent être poursuivies dans les domaines importants énumérés ci-après:

— propagation sur les trajets mixtes,
— effets d'écran produits par des obstacles et diffusion par les obstacles,
— affaiblissement de transmission aux fréquences supérieures à 3 GHz (liaisons de Terre),
— variation de l'affaiblissement de transmission sur les trajets Terre-espace,
— probabilités de brouillage entre les services spatiaux et les services de Terre, par exemple effets de la diffusion par les précipitations,
— des attributions de fréquences ont été faites jusqu'à 40 GHz; il s'agit maintenant de recueillir des renseignements supplémentaires sur les paramètres de la propagation (par exemple absorption et diffusion) jusqu'à cette fréquence limite et au-delà,
— problèmes radiométéorologiques se rapportant à toutes les questions énumérées ci-dessus.

Les Questions et les Programmes d'études associés qui figurent dans ce Volume indiquent dans le détail de quelle manière la Commission a entrepris l'étude des problèmes précités. Il convient toutefois de faire une mention spéciale des trois problèmes évoqués ci-après.

2.1 *Radiométéorologie*

La propagation sur les fréquences supérieures à 30 MHz est influencée profondément par les conditions météorologiques et il est extrêmement important d'obtenir à cet égard des résultats pour une gamme aussi étendue que possible de variations des conditions climatiques. Un Groupe de travail intérimaire d'experts (voir la Résolution 3-1) est chargé de poursuivre les études dans ce domaine. La question revêt une importance particulière dans les zones à climat tropical et semi-tropical. Etant donné que beaucoup de pays nouveaux ou en voie de développement se trouvent dans ces régions, il est clair que ces pays peuvent apporter une contribution décisive aux progrès en cette matière, en effectuant des mesures de propagation et en présentant leurs résultats à la Commission d'études pour examen et inclusion dans ses Rapports et ses Avis. Les Questions 2-1/5 et 8/5 et les passages pertinents des Programmes d'études 5-1B-1/5, 5-1C-1/5, 5-1D-1/5 et 5-1E-1/5 signalent les points auxquels il faut accorder une attention particulière.

2.2 *Partage des fréquences*

Avec le développement des systèmes spatiaux et des systèmes de Terre fonctionnant sur des fréquences supérieures à environ 1 GHz, il est évident que l'utilisation rationnelle du spectre exigera un partage des fréquences aussi poussé que possible, compte tenu des exigences économiques. C'est pourquoi il est extrêmement urgent d'accomplir les efforts nécessaires en vue de réaliser cet objectif. Les études correspondantes sont spécifiées dans la Question 5-1/5 et dans les Programmes d'études associés 5-1A-1/5, 5-1B-1/5, 5-1D-1/5 et 5-1F-1/5. Ce travail est l'une des tâches importantes confiées à un autre Groupe de travail intérimaire (voir la Résolution 2-1).

Il ne faut pas perdre de vue que, en raison de l'absence de données de propagation sûres pour un grand nombre de régions tropicales (voir plus haut), le partage des fréquences entre des services différents dans ces zones est susceptible de soulever des difficultés qu'il n'est pas possible de prévoir à l'heure actuelle.

Ici encore, les problèmes de partage des fréquences ne semblent peut-être pas extrêmement urgents dans certains pays, mais il convient que toutes les administrations gardent ces problèmes présents à l'esprit dès les premiers temps de la planification de systèmes nouveaux.

2.3 *Application des techniques du calcul électronique*

L'application des techniques du calcul électronique à la détermination de l'affaiblissement de transmission sur les trajets entre points fixes est maintenant un fait bien établi, mais jusqu'à présent l'estimation de la couverture assurée par la radiodiffusion a été faite principalement sur la base de courbes empiriques qui étaient tracées d'après des résultats d'observation obtenus en un certain nombre de points des zones desservies par des émetteurs typiques en exploitation. Il est vrai que, pendant un certain temps, les techniques du calcul électronique ont été appliquées au problème de la détermination des emplacements des émetteurs fonctionnant dans un même canal, afin d'éviter les brouillages; toutefois, c'est à une date récente seulement que l'on a commencé à utiliser ces techniques sérieusement pour déterminer les zones de couverture en radiodiffusion, sur la base d'une évaluation statistique d'un grand nombre de trajets entre points fixes, à l'intérieur d'une zone appropriée. On peut s'attendre à des progrès spectaculaires du fait de l'emploi de ces techniques.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5A: PROPAGATION, PRÉVISIONS ET COURBES, PROBLÈMES D'INTERFÉRENCES

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 311-1

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

Radiodiffusion et télévision

(1953 – 1956 – 1959 – 1970)

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%, 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 $x = 0$, $x \to \infty$ et $x \to -\infty$ 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:

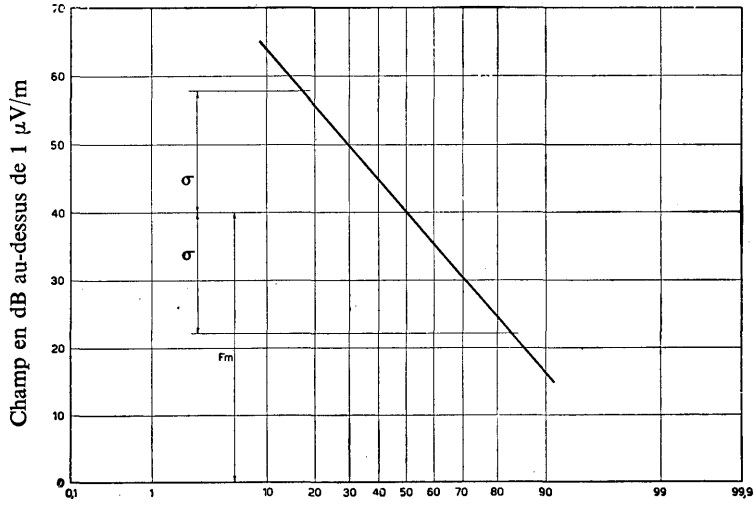
$$P(F) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{F}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{f-F_m}{\sigma}\right)^2} df$$

$P(F)$ est la probabilité (pourcentage de temps ou d'emplacements) que le champ E, exprimé en décibels au-dessus d'un microvolt par mètre ($F = 20 \log E$), 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 σ et 1,28 σ.

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 370-1

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

Radiodiffusion et services mobiles

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

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 239-2),

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 des 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 L'effet d'une modification de la hauteur de l'antenne de réception est étudié au § 4.2 du Rapport 239-2.

1.6 Une méthode permettant de déterminer les champs au-dessus de trajets mixtes est décrite dans le Rapport 239-2.

---

* 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.

** On doit noter 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 (30-250 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, 2 et 3 indiquent les champs dépassés pour 50% des emplacements de réception pendant, respectivement, 50%, 10% et 1% du temps. Les courbes correspondant à des valeurs dépassées pendant 50% et 10% du temps sont valables pour les trajets terrestres et pour les trajets maritimes dans la région de la mer du Nord. La Fig. 4 indique les valeurs dépassées pendant 1% du temps sur des trajets maritimes dans la région de la mer du Nord. 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, 2 et 3 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, 2 ou 3, 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 la bande III et pour ces types de terrain, la valeur du facteur de correction d'affaiblissement (en dB) indiqué à la Fig. 8*a*.

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 239-2.

ANNEXE II

BANDES DES ONDES DÉCIMÉTRIQUES (450-1000 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. 8*b*.

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. Les Fig. 13, 14, 15 et 16 donnent les valeurs du champ dépassé en 50% des points de réception dans des régions côtières pendant 50%, 10%, 5% et 1% du temps respectivement. Ces courbes se rapportent à la propagation dans les régions de la mer du Nord et de la Méditerranée; les valeurs relevées sur les plus grandes distances proviennent de mesures faites dans la région de la mer du Nord. Quelques mesures effectuées en région méditerranéenne pour la valeur médiane du champ concordent d'une façon satisfaisante avec ces courbes. Il a été constaté, cependant, que les champs dépassés pendant de faibles valeurs du temps dans la région méditerranéenne sont plus élevés que ceux constatés dans la région de la mer du Nord.

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. 17*a* et 17*b* représentent les courbes des valeurs du champ pour 1% et 10% du temps sur des trajets mixtes (terrestre et maritime), 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 239-2.

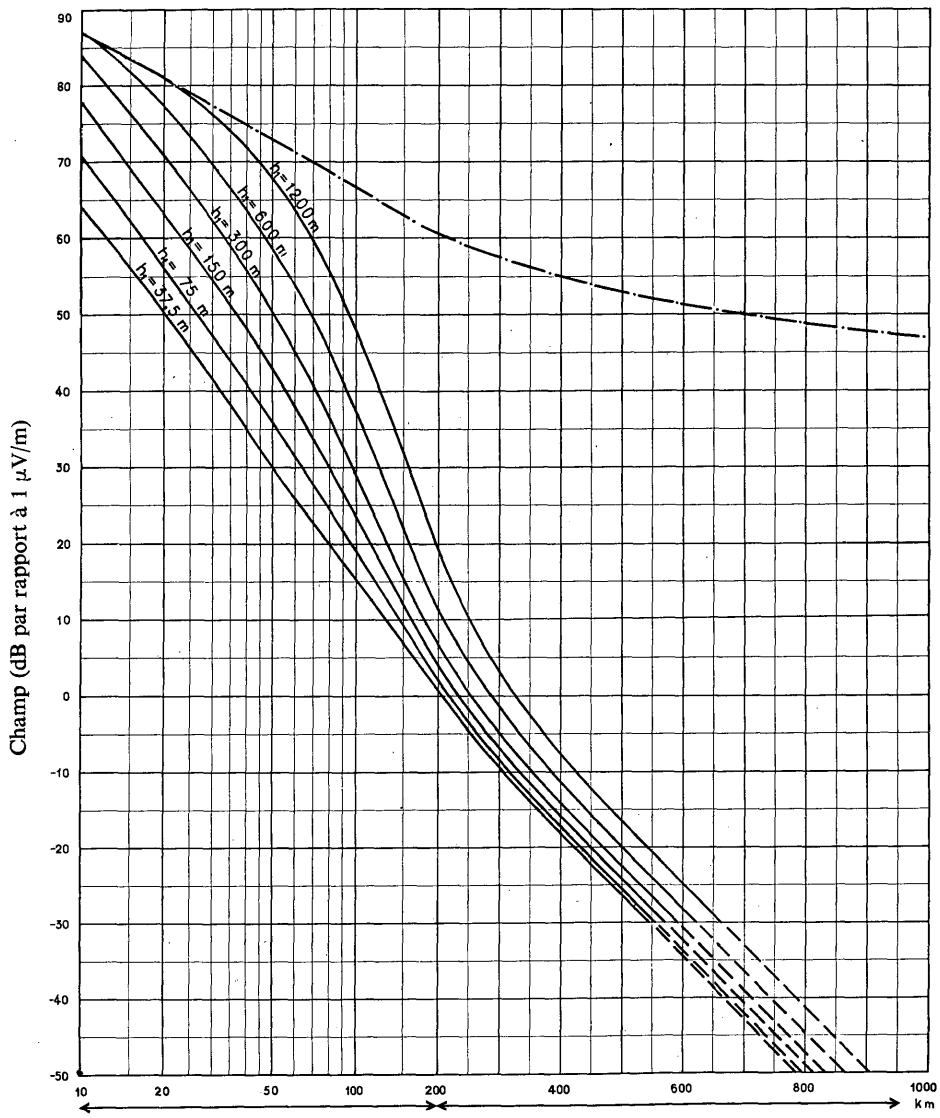


FIGURE 1

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

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

———·———·——— Espace libre

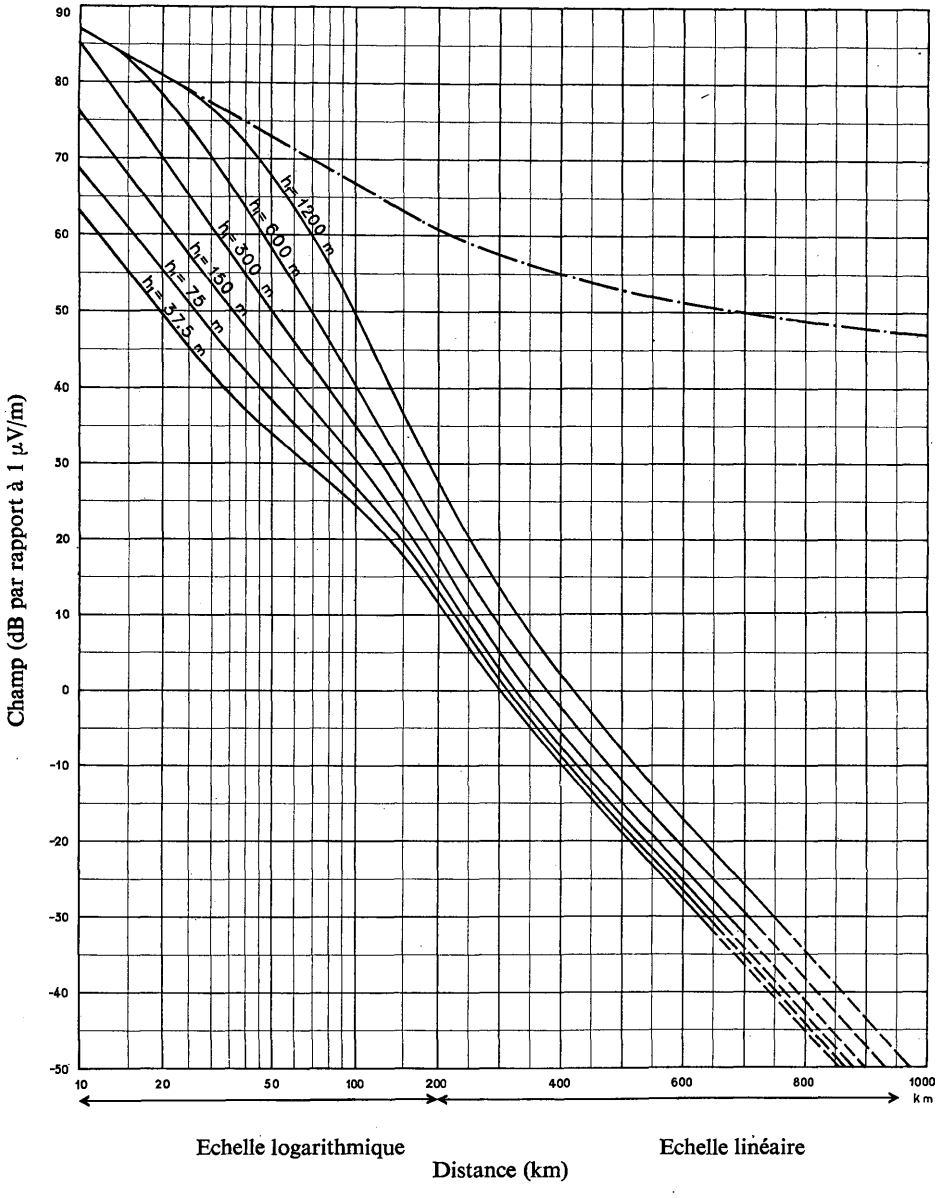


FIGURE 2

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

Fréquences: 30-250 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

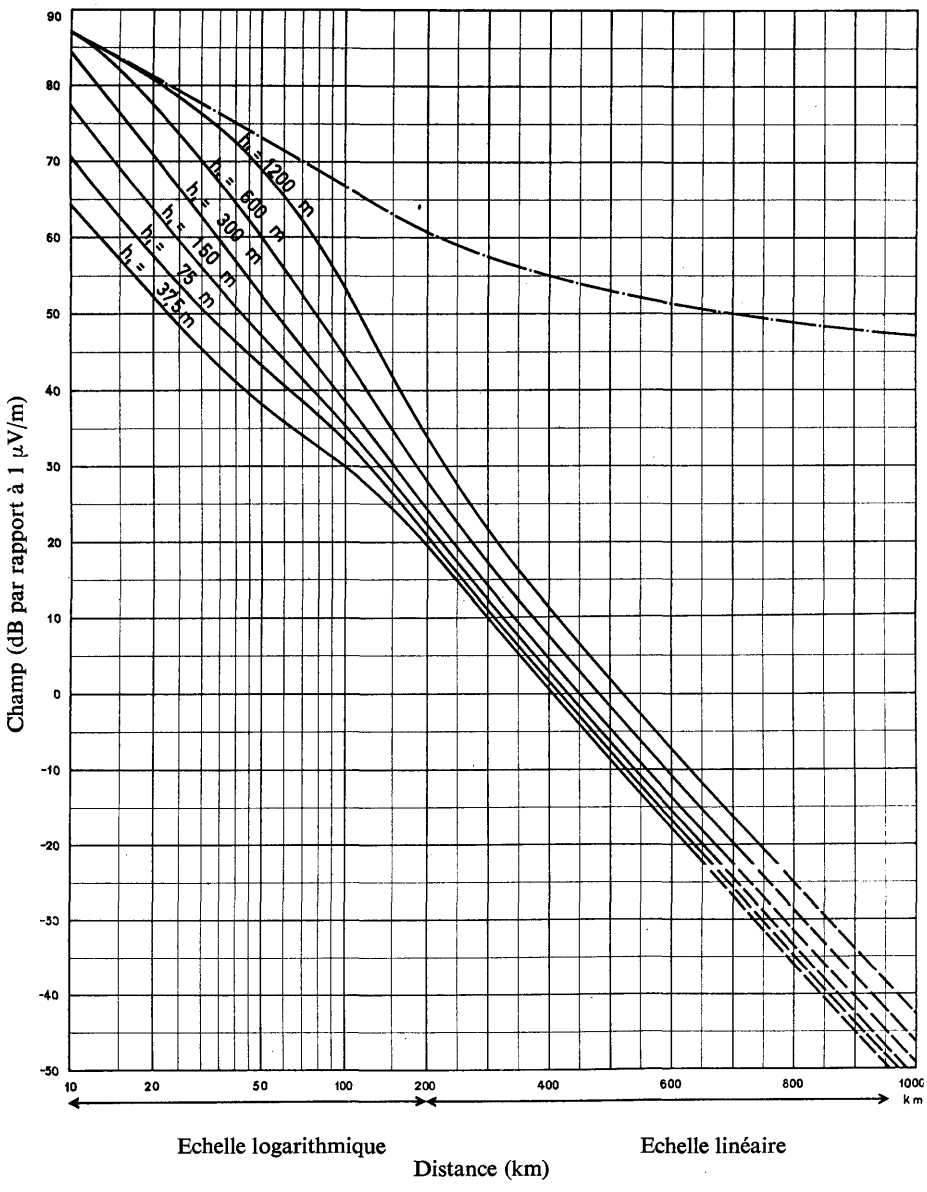


FIGURE 3

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

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

———·———·——— Espace libre

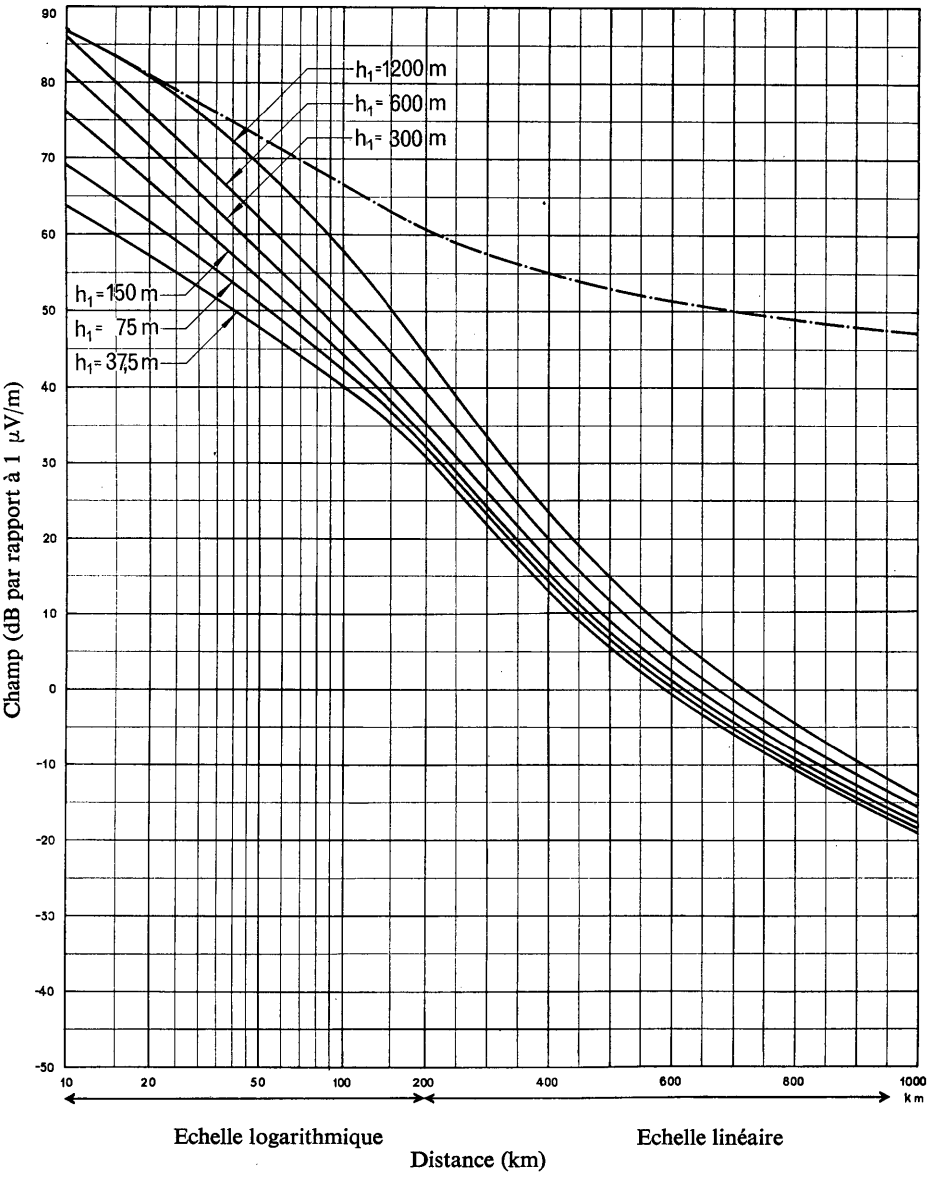


FIGURE 4

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

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

———— Espace libre

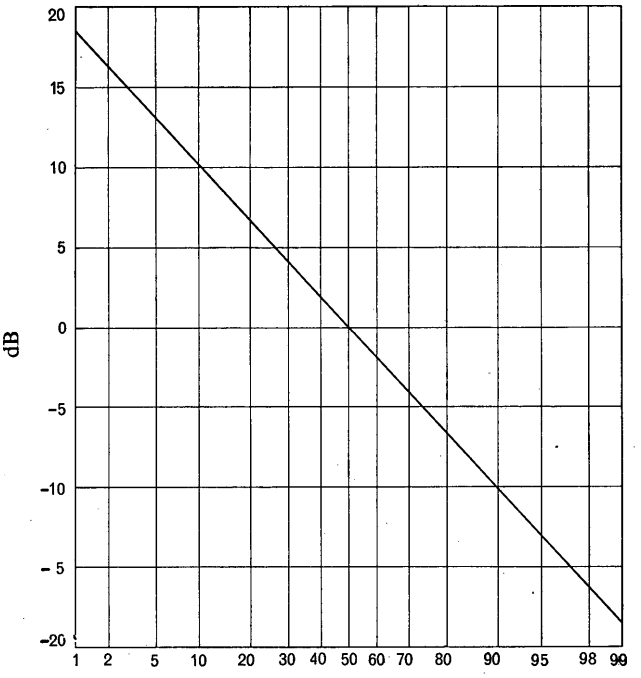


FIGURE 5

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

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

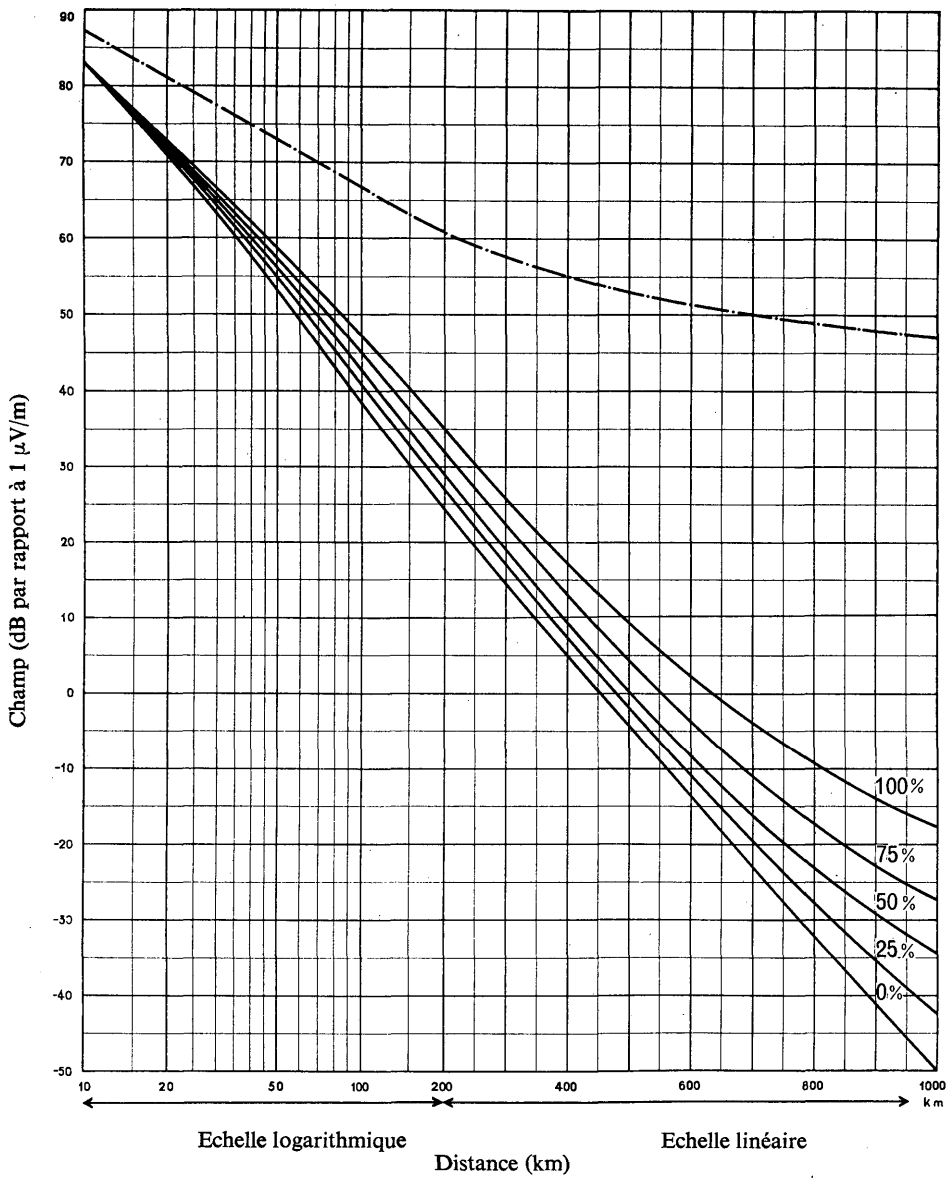


FIGURE 6

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

Fréquences: 30-250 MHz (Bandes I, II et III) — trajet mixte, terre et mer (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

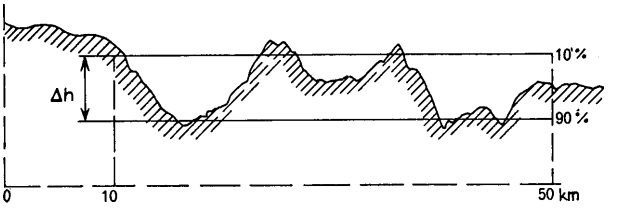


FIGURE 7

Définition du paramètre Δh

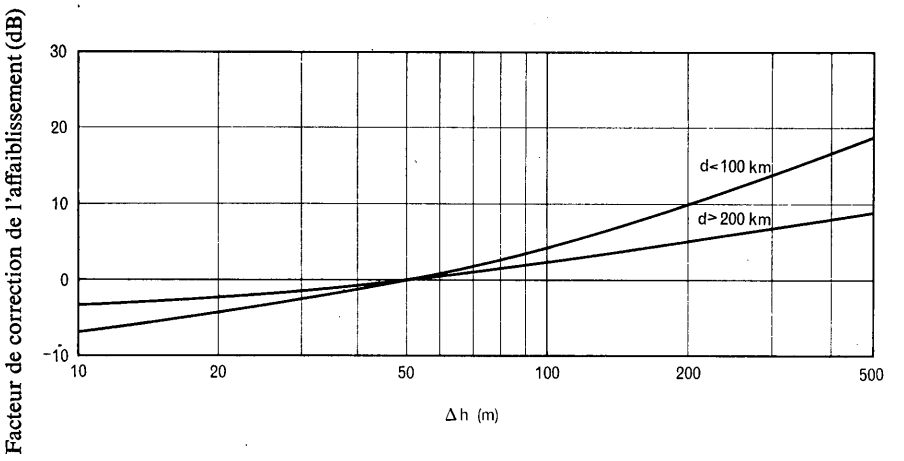


FIGURE 8*a*

Facteur de correction de l'affaiblissement, en fonction de Δh, pour des fréquences de 150 à 250 MHz (Bande III)

(*d* est la distance de l'émetteur)

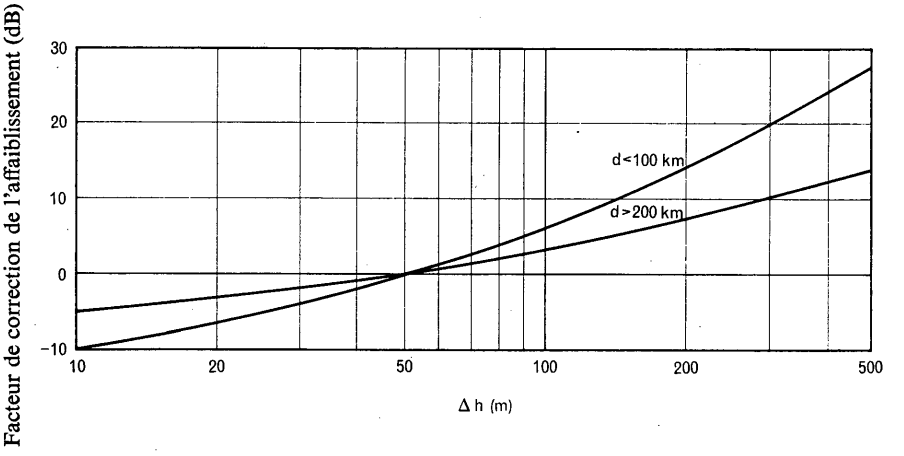


FIGURE 8*b*

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)

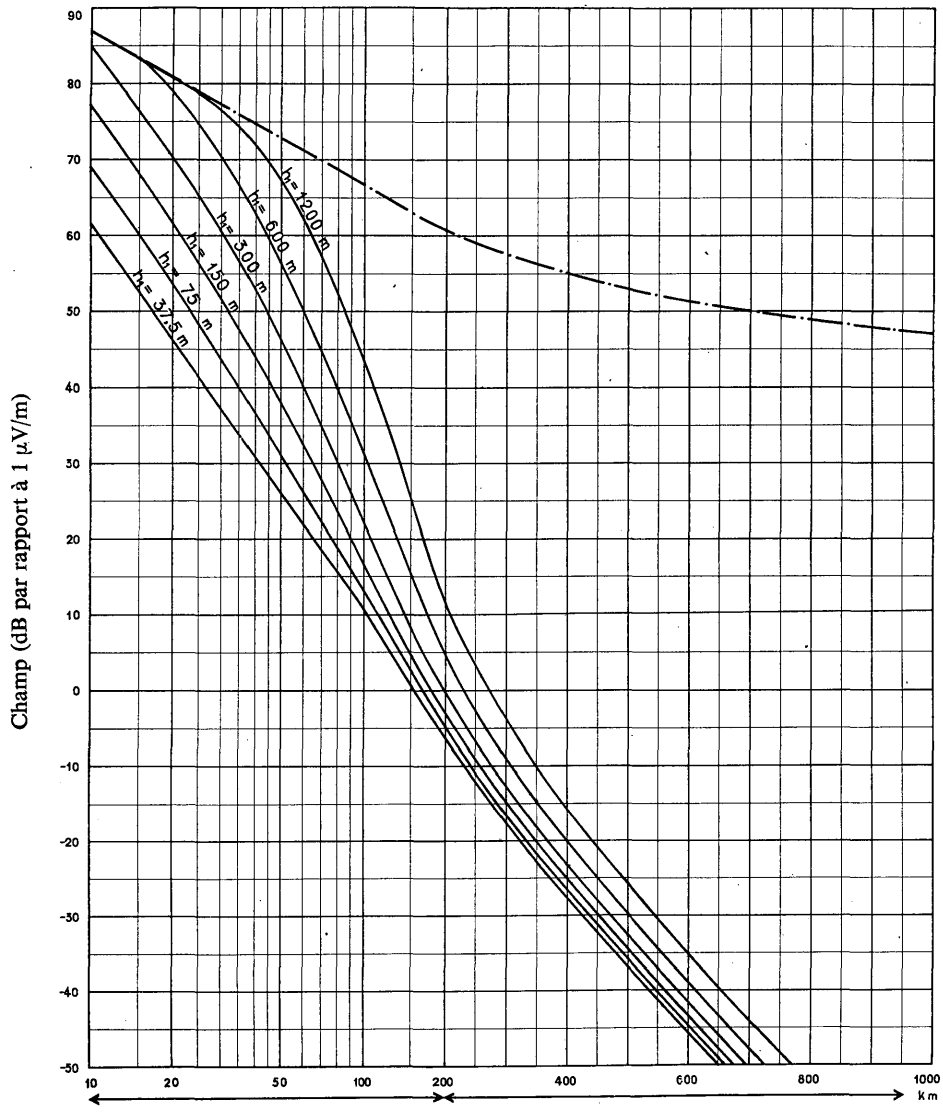


FIGURE 9

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

Fréquences: 450-1000 MHz (Bandes IV et V) — Terre — 50% du temps — 50% des emplacements — h_2 = 10 m — Δh = 50 m

—·—·—·— Espace libre

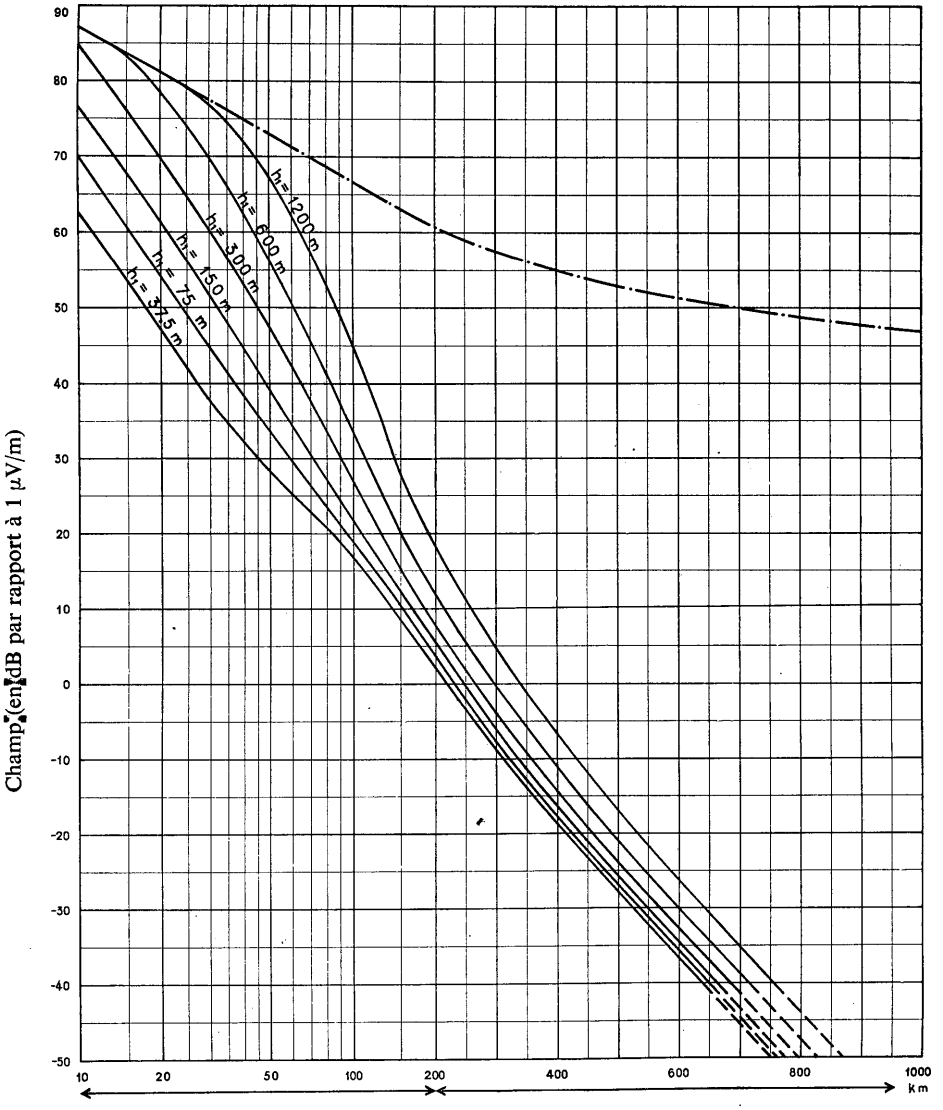


FIGURE 10

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

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

—·—·—·— Espace libre

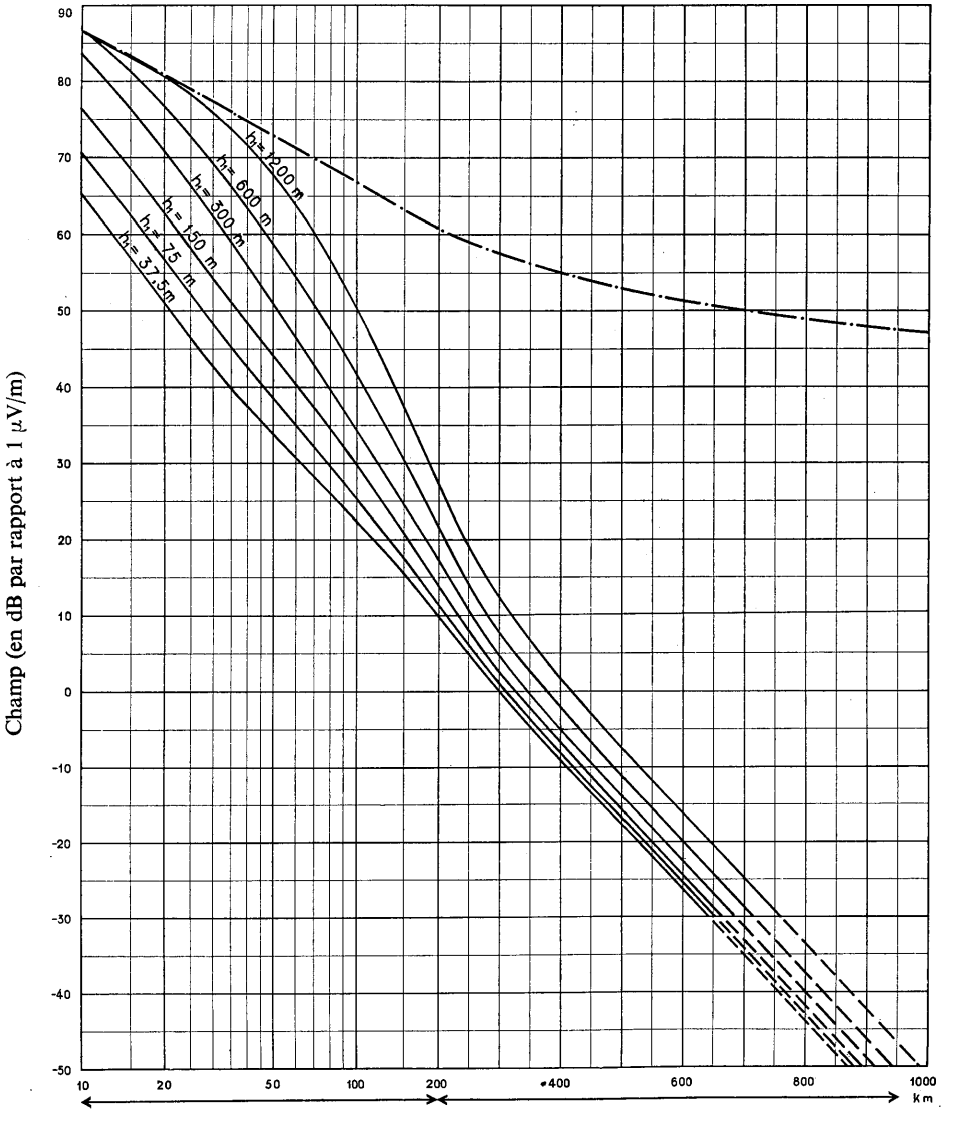


FIGURE 11

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

Fréquences: 450-1000 MHz (Bandes IV et V) — Terre — 1% du temps — 50% des emplacements — h_2 = 10 m — Δh = 50 m

———·———·——— Espace libre

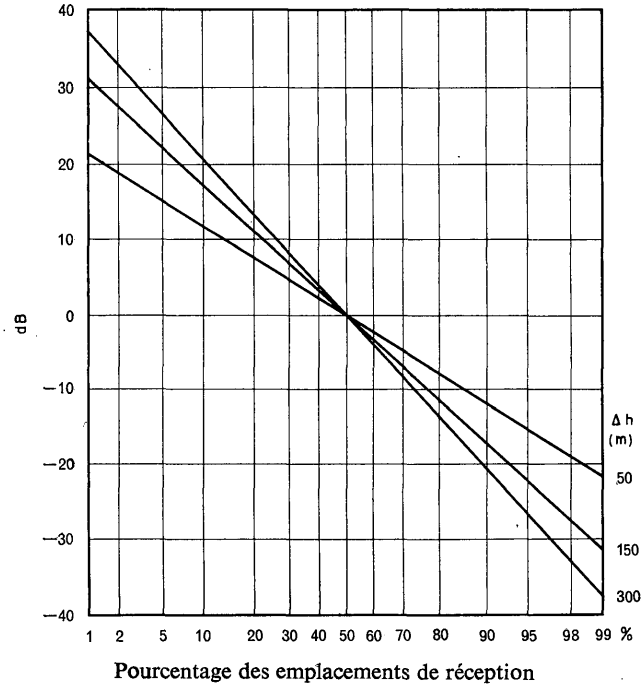


FIGURE 12

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

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

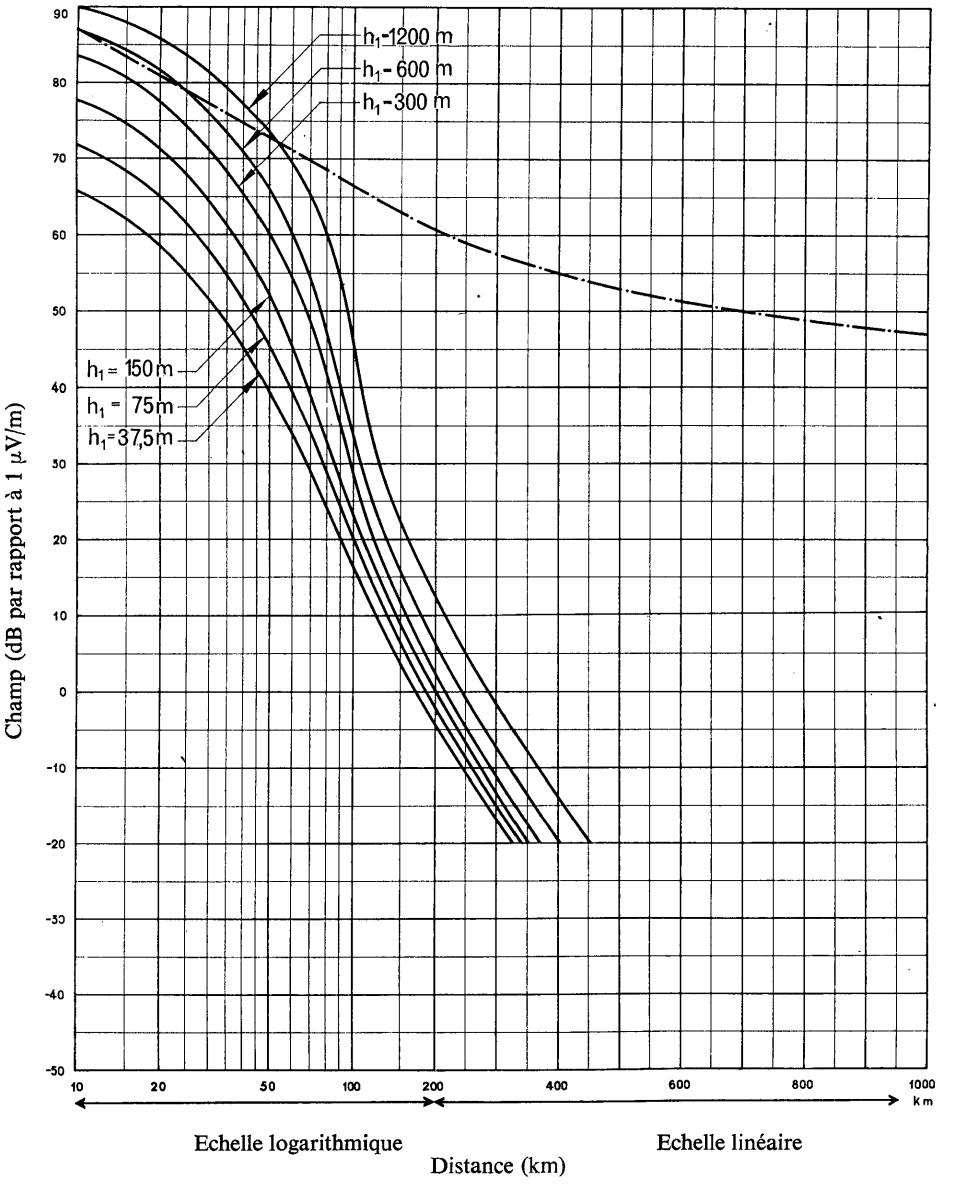


FIGURE 13

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

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

—·—·—·— Espace libre

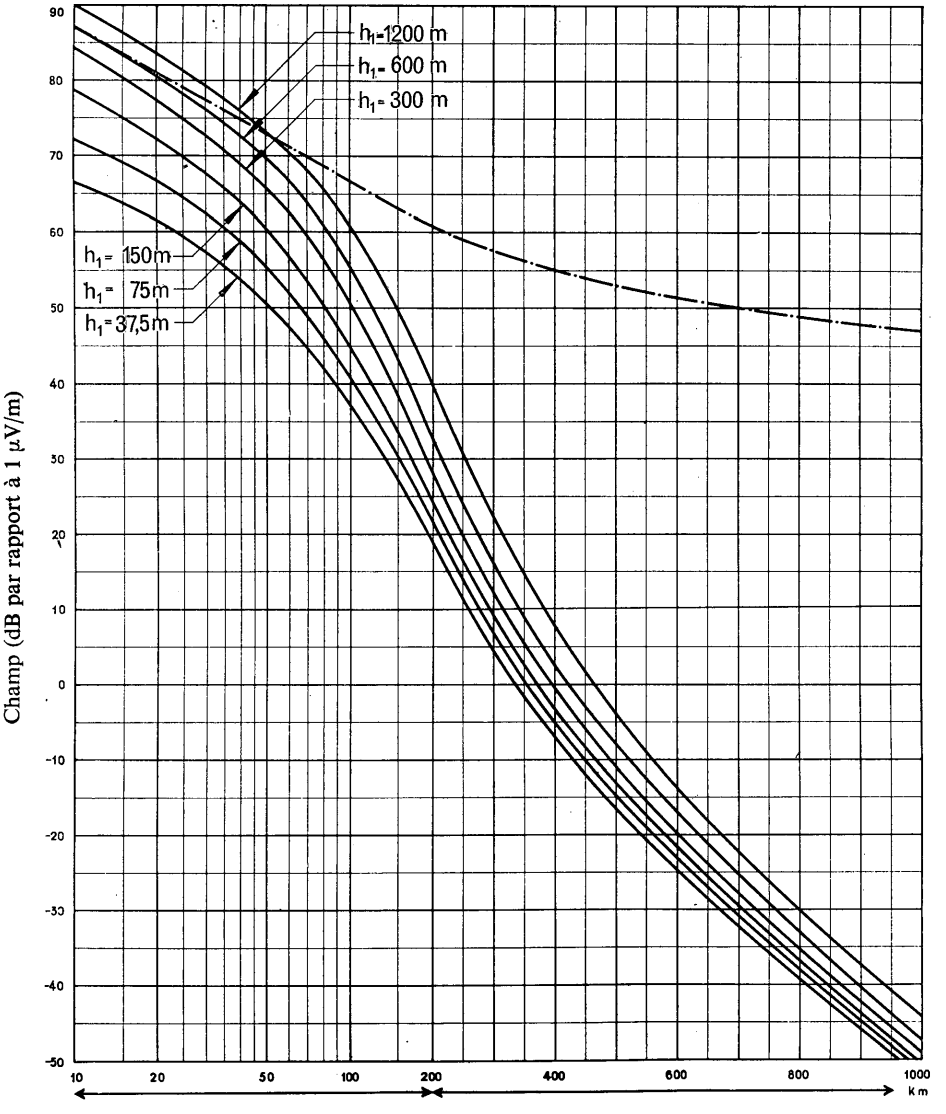


FIGURE 14

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

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

———·———·——— Espace libre

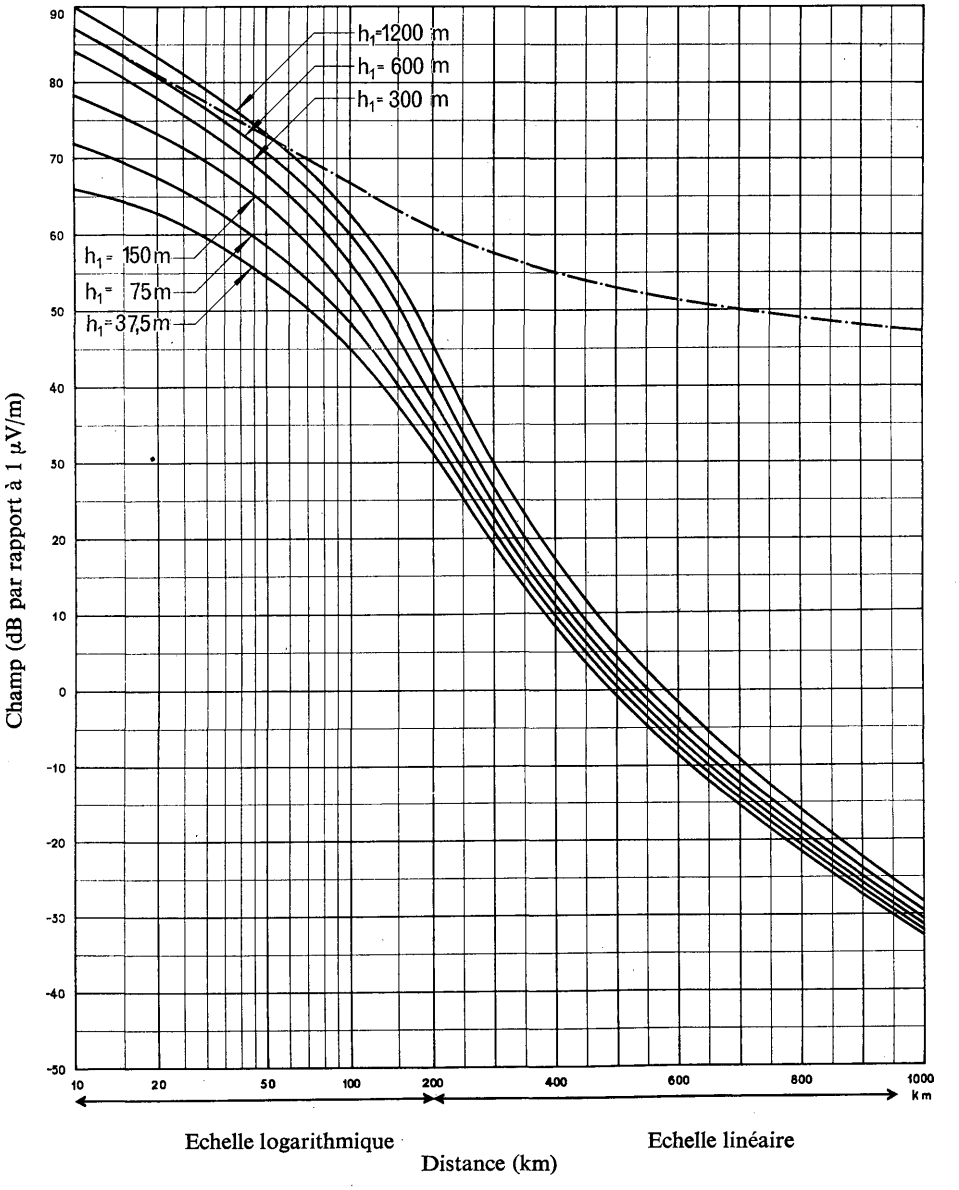


FIGURE 15

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

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

———·———·——— Espace libre

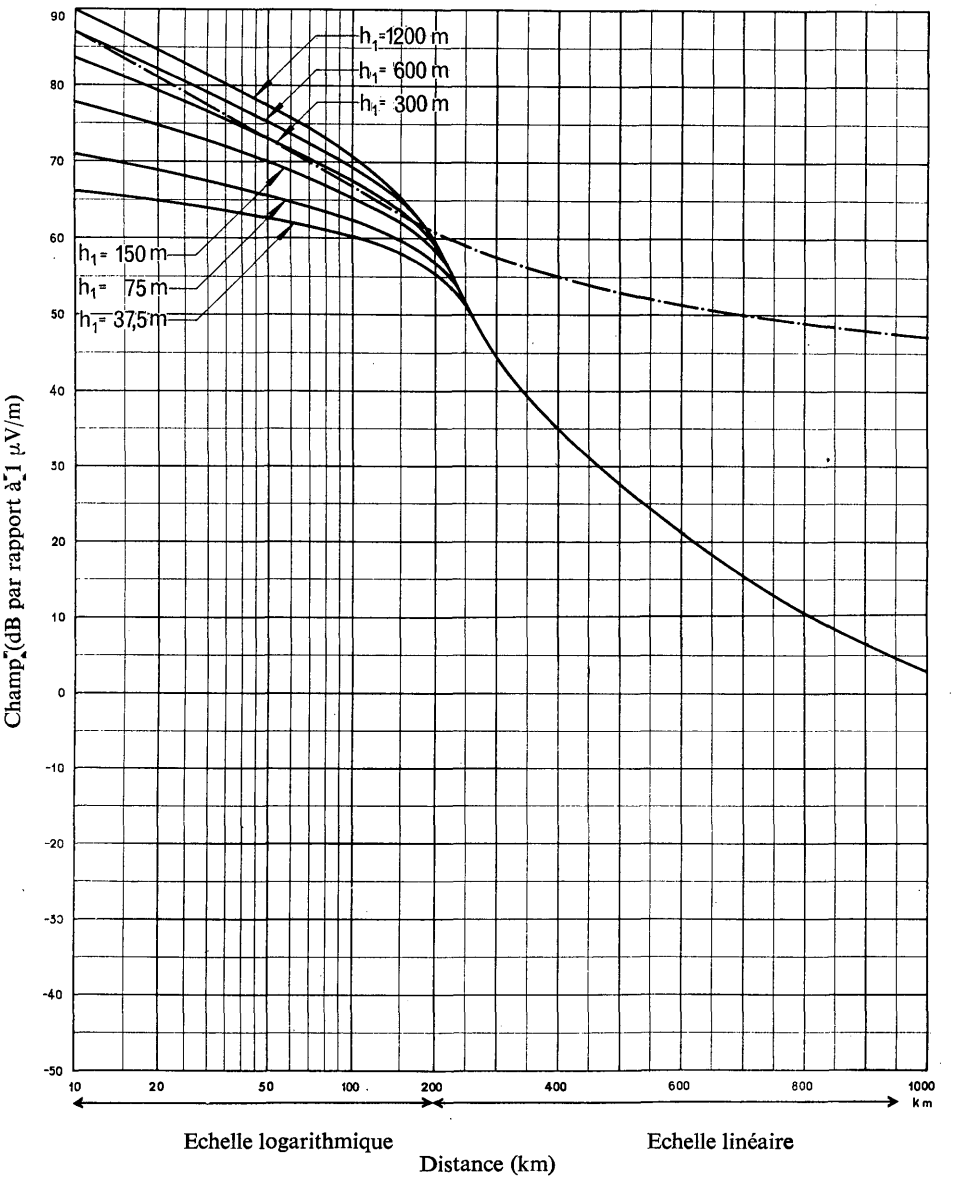


FIGURE 16

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

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

———·———·——— Espace libre

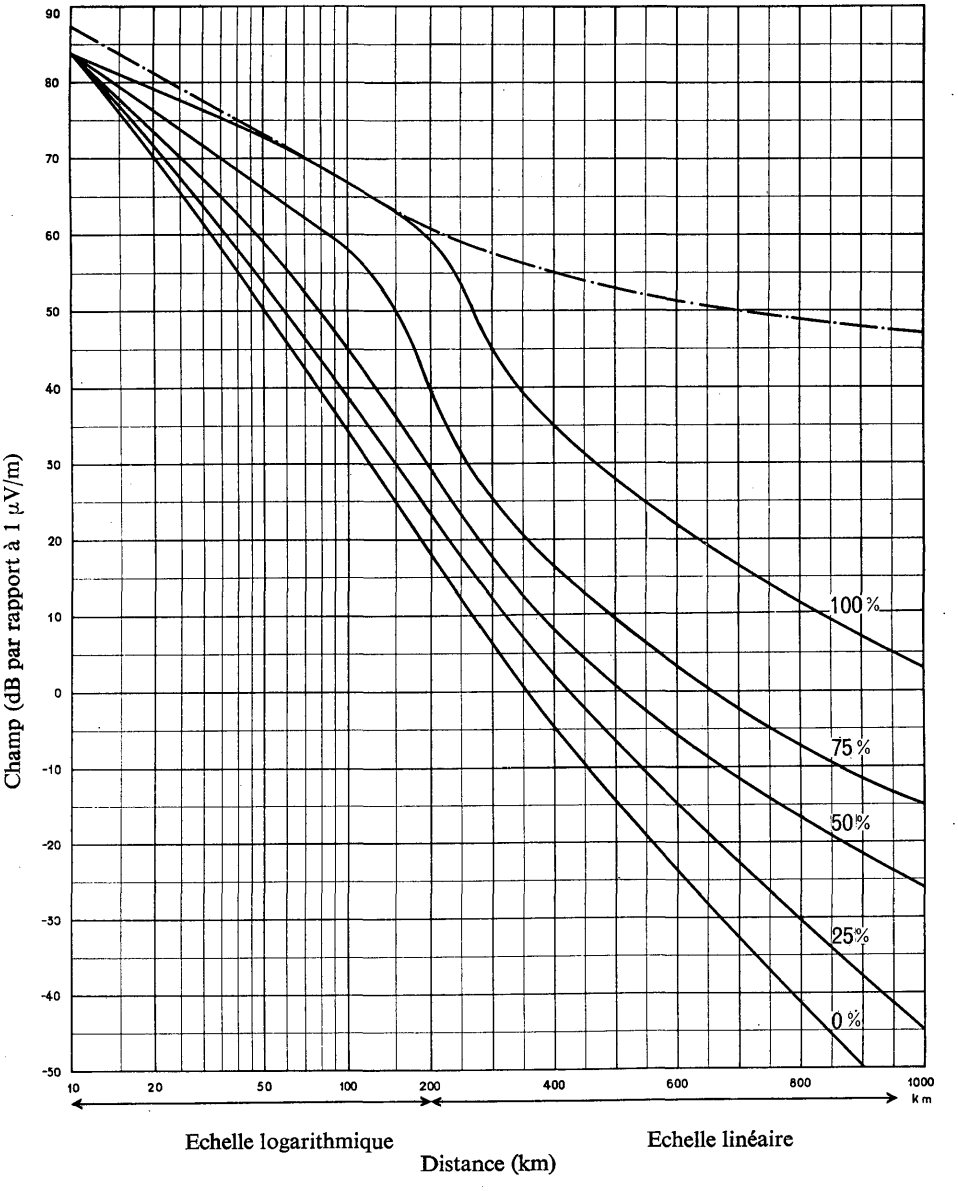


FIGURE 17*a)*.

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

Fréquences: 450-1000 MHz (bandes IV et V); trajet mixte (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

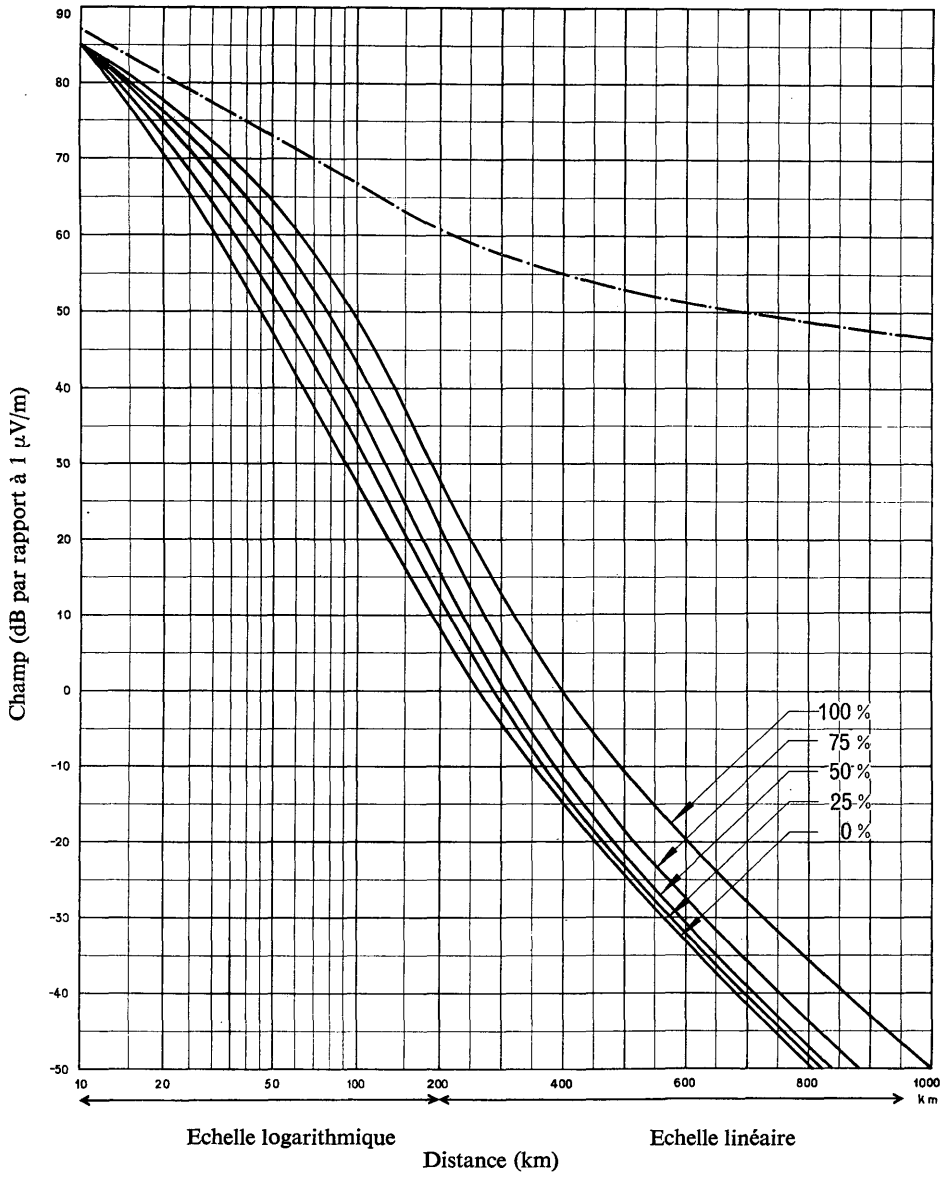


FIGURE 17*b*

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

Fréquences: 450-1000 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

AVIS 452

CONSIDÉRATIONS RELATIVES A LA PROPAGATION POUR ÉVALUER LES BROUILLAGES ENTRE SERVICES SPATIAUX ET SERVICES DE TERRE FONCTIONNANT DANS UNE MÊME VOIE

(1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que, pour évaluer les brouillages entre services spatiaux et services de Terre fonctionnant dans la même voie, il est nécessaire de calculer l'affaiblissement dû à la transmission sur divers types de trajets;

b) que, dans la Question 5-1/5, la Commission d'études 5 a été priée par les Commissions d'études 4 et 9 de fournir les renseignements sur la propagation, nécessaires pour les systèmes de télécommunication par satellite ainsi que pour les systèmes de Terre sur faisceaux hertziens,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les administrations utilisent les méthodes de calcul de l'affaiblissement de transmission décrites dans les Rapports 239-2, 244-2 et 425, qu'elles décident de celles qu'elles considèrent comme les plus appropriées dans telles ou telles conditions et qu'elles fassent connaître au Directeur du C.C.I.R. les méthodes qu'elles utilisent et les résultats obtenus.

5A: *Rapports*

RAPPORT 227 *

MESURE DU CHAMP, DE LA DENSITÉ DU FLUX DE PUISSANCE, DE LA PUISSANCE RAYONNÉE, DE LA PUISSANCE DISPONIBLE AUX BORNES DE L'ANTENNE DE RÉCEPTION ET DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION

(1959 – 1963)

1. Introduction

L'objet du présent Rapport est de réunir en un seul document les données disponibles en ce qui concerne la Question 8 mise à l'étude pour la première fois lors de la V^e Assemblée plénière (1948). Depuis cette époque, il est apparu que, dans de nombreuses applications, on s'est mis à mesurer d'autres paramètres que le champ, en particulier pour décrire le fonctionnement des systèmes dans leur ensemble. Ces paramètres sont les suivants: densité du flux de puissance, puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception et affaiblissement de transmission **. Les relations entre ces paramètres sont indiquées en annexe.

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 [7, 8, 9]. 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 [7, 8, 9]; toutefois, dans certains appareils de mesure de champ portatifs, on emploie parfois ces

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

** On trouvera un exposé complet sur la notion d'affaiblissement de transmission dans l'Avis 341 et le Rapport 112.

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 [1, 2, 3, 4, 13, 15], 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.

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 résul-

tats 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 [10] 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) [1, 3]. La notion d'affaiblissement de transmission est très utile pour l'étude de certains systèmes et de certains modes de propagation [16]. 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 (± dB)	Champ minimal pour lequel on obtient cette précision (μV/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 μV/m correspond à $2{,}7.10^{-15}$ 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 [1, 3, 13].

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 [1, 2, 7]

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 [5, 8, 9, 14]. 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 [6, 8, 9, 14]. 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 [7]

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) Variable (1-12) (2)	0,001 (3)	0,160 (3) 0,600 (2)	0,160 (1)
25-300	120 (1) 150 (2)	0,001 (3)	0,550 (1) 0,600 (2)	0,1 (1)

(1) C.I.S.P.R. [1].
(2) A.S.A. [2].
(3) Employées par ces deux organismes.

13.4 *Tension efficace*

La tension efficace [17] 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 [18]. 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 [11, 17].

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 créneaux 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 [12].

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 dans le Règlement des radiocommunications, Genève, 1959.

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.

ANNEXE

RELATIONS ENTRE LE CHAMP, LA DENSITÉ DU FLUX DE PUISSANCE ET LA PUISSANCE DISPONIBLE AUX BORNES DE L'ANTENNE DE RÉCEPTION

Désignons par e la valeur du champ, exprimée en volts/mètre. La densité du flux de puissance du champ, exprimé en W/m^2, est donnée par l'expression

$$f = \frac{e^2}{z} \tag{1}$$

où z désigne l'impédance caractéristique du milieu dans lequel on effectue la mesure. Dans l'air ou dans l'espace libre: $z \approx 120\,\pi\,(\Omega)$.

La surface de captation d'une antenne de réception ayant un gain g_r par rapport à une antenne isotrope peut s'exprimer par

$$a_e = \frac{\lambda^2\, g_r\, r_f}{4\,\pi\, r} \tag{2}$$

où λ est la longueur d'onde dans le milieu considéré, r la résistance de rayonnement de l'antenne et r_f la valeur qu'aurait cette résistance si l'antenne se trouvait en espace libre. En combinant les équations (1) et (2), on trouve que la puissance disponible aux bornes d'une antenne de réception sans pertes p'_a, est donnée par l'expression:

$$p'_a = \frac{e^2\,\lambda^2\, g_r\, r_f}{4\,\pi\, z\, r} = \frac{v^2}{4r} \tag{3}$$

v désignant la tension en circuit ouvert, induite dans l'antenne de réception. En tirant v de cette dernière équation, on trouve la relation générale entre la valeur du champ et la tension en circuit ouvert pour une antenne ayant un gain g_r et une résistance de rayonnement r_f en espace libre:

L'équation (4) montre que la mesure du champ se fait essentiellement en deux temps:

$$v = e\,\sqrt{\lambda^2\, g_r\, r_f / \pi z} = e\, l \tag{4}$$

— mesure de la tension en circuit ouvert, et
— détermination, par le calcul ou la mesure, de la hauteur effective l de l'antenne de réception [5, 6, 15, 19].

De même, on voit d'après l'équation (3) que la mesure de la puissance disponible se fait aussi en deux temps:

— mesure de la tension en circuit ouvert, et

— détermination, par le calcul ou la mesure, de la résistance de rayonnement de l'antenne de réception. On notera, cependant, que la résistance de rayonnement, et par suite la puissance disponible, dépendent de la hauteur de l'antenne de réception au-dessus du sol, tandis que la hauteur effective est indépendante de cette hauteur ou des autres conditions locales, tout au moins en première approximation. C'est une des raisons pour lesquelles il est plus avantageux, dans certaines applications, de mesurer le champ plutôt que la puissance disponible. On observera que l'affaiblissement de proportions L_p est défini de telle manière qu'il est, lui aussi, indépendant de ces influences locales sur l'impédance de l'antenne (on trouvera dans le Rapport 112 un exposé complet sur l'affaiblissement de propagation).

Bibliographie

1. Publication 1 du C.I.S.P.R.: Spécifications de l'appareillage de mesure C.I.S.P.R. pour les fréquences comprises entre 0,15 et 30 MHz.
   Publication 2 du C.I.S.P.R.: Spécifications de l'appareillage de mesure C.I.S.P.R. pour les fréquences comprises entre 25 et 300 MHz.
2. 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.
3. 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.
4. *Rapport Sc.* 12-1, *C.E.I.*
5. Greene, F.M. Calibration of commercial radio field strength meters at the National Bureau of Standards. NBS Circular 517 (décembre 1951).
6. McPetrie, J.S. and Saxton, J.A. Theory and experimental confirmation of calibration of field strength measuring sets by radiation. *Journal I.E.E.*, **88**, Part III, 11 (1941).
7. Chapin, E. Field strength measurements. *FCC Rapport L.D. 6.3.1.*
8. Terman, F.E. et Pettit, J.M. *Electronic measurements*, chap. XI. McGraw-Hill (1951).
9. Smith-Rose, R.L. Radio field-strength measurement. *Proc. I.E.E.* (Radio and Comm.), **96**, Part III (janvier 1949).
10. Smith, W.B. Recording sky-wave signals from broadcast stations. *Electronics*, **21**, 112 (novembre 1945).
11. Crichlow, W.Q. et Spaulding, A.D. A graphical method of obtaining amplitude-probability distributions from statistical moments of atmospheric radio noise; exposé présenté à la réunion commune U.R.S.I.-IRE (20-22 octobre 1958), Université de l'Etat de Pennsylvanie.
12. Watt, A.D. et autres. Performance of some radio systems in the presence of thermal and atmospheric noise. *NBS Journ. of Research*, Part B (juillet 1959).
13. Recommended practice for measurement of field intensity above 300 Mc/s from radio-frequency industrial, scientific and medical equipments. *A.I.E.E.*, 950 (avril 1951).
14. *Handbook of Electronic Measurements*, Vol. II, chapitre VIII, édité par M. Wind. Polytechnic Institute of Brooklyn, Inter-science publishers.
15. Standards on radio wave propagation measuring methods. Supplément aux *Proc. IRE*, Vol. 30, **7**, Part II (1942).
16. Norton, K.A. Transmission loss in radio propagation (I and II). Part I: *Proc. IRE*, **41** (janvier 1953); Part II: NBS Technical Note 12 (juin 1959) Office of technical services, U.S. Department of Commerce, Washington 25, D.C.
17. *Comptes rendus de l'U.R.S.I., XII^e Assemblée générale*, Boulder, Colorado, Vol. XI, 4^e partie, Commission IV.
    — Rapport 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.
    — Recommandation N° 1 et Annexe à la Recommandation N° 1: Measurement of atmospheric noise, 99.

18. Rapport 65 du C.C.I.R. Révision des données sur les bruits atmosphériques radioélectriques.
19. DIAMOND, H., NORTON, K. A. et LAPHAM, E. G. On the accuracy of radio field-intensity measurement at broadcasting frequencies. *NBS Journ. of Research*, **21**, 795-818 (décembre 1938).
20. NORTON, K.A. System loss in radio wave propagation. *NBS Journ. of Research*, Part D (juillet 1959).

RAPPORT 228-1 *

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

(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 radiodiffusion travaillant en ondes métriques et décimétriques.

Une méthode acceptable pour le but recherché doit satisfaire aux conditions suivantes [1]:

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 [1, 2] 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

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

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.

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 [2, 3].

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 μV/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 [2, 3].

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 [2]. 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 [2, 4].

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 [8].

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 omnidirective.

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 μV/m pour les ondes métriques, et entre 60 et 80 dB au-dessus de 1 μV/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 généralement 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 6 σ, 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 [3, 5, 6]. 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 MHz 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 [2, 3, 5, 6, 7] 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 μV/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.

BIBLIOGRAPHIE

1. Report to the Federal Communications Commission of Committee 5.3 of the Television Allocation Study Organization (TASO) (mars 1959).
2. 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. Federal Communications Commission, Mimeograph 36830 (mai 1949) et Mimeograph 54382 (7 juillet 1950).
3. KIRBY, R.S. Measurement of service area for television broadcasting. *Trans. IRE*, PGBTS-7, **23** (février 1957).
4. NORTON, K.A., STARAS, H. et BLUM, M. Statistical approach to the problem of multiple radio interference to FM and television service. *Trans. IRE*, AP-1, **43** (février 1952).
5. KIRBY, R.S. et CAPPS, F.M. Correlation in VHF propagation over irregular terrain. *Trans. IRE* AP-4, 1, **72** (janvier 1956).
6. KIRBY, R.S., DOUGHERTY, H.T. et MCQUATE, P.L. VHF propagation measurements in the Rocky Mountain Region. *Trans. IRE*, PGVC-6, **13** (juillet 1956).
7. KÜHN, U. 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). *Technische Mitteilungen aus dem Betriebslaboratorium für Rundfunk und Fernsehen (BRF)* (février et mai 1958).
8. GENTILE, G. Mesure de champ aux fréquences supérieures à 30 MHz. Méthode appliquée par le Centre de contrôle de la R.A.I. à Monza. *Revue de l'U.E.R.*, **97-A** (juin 1966).

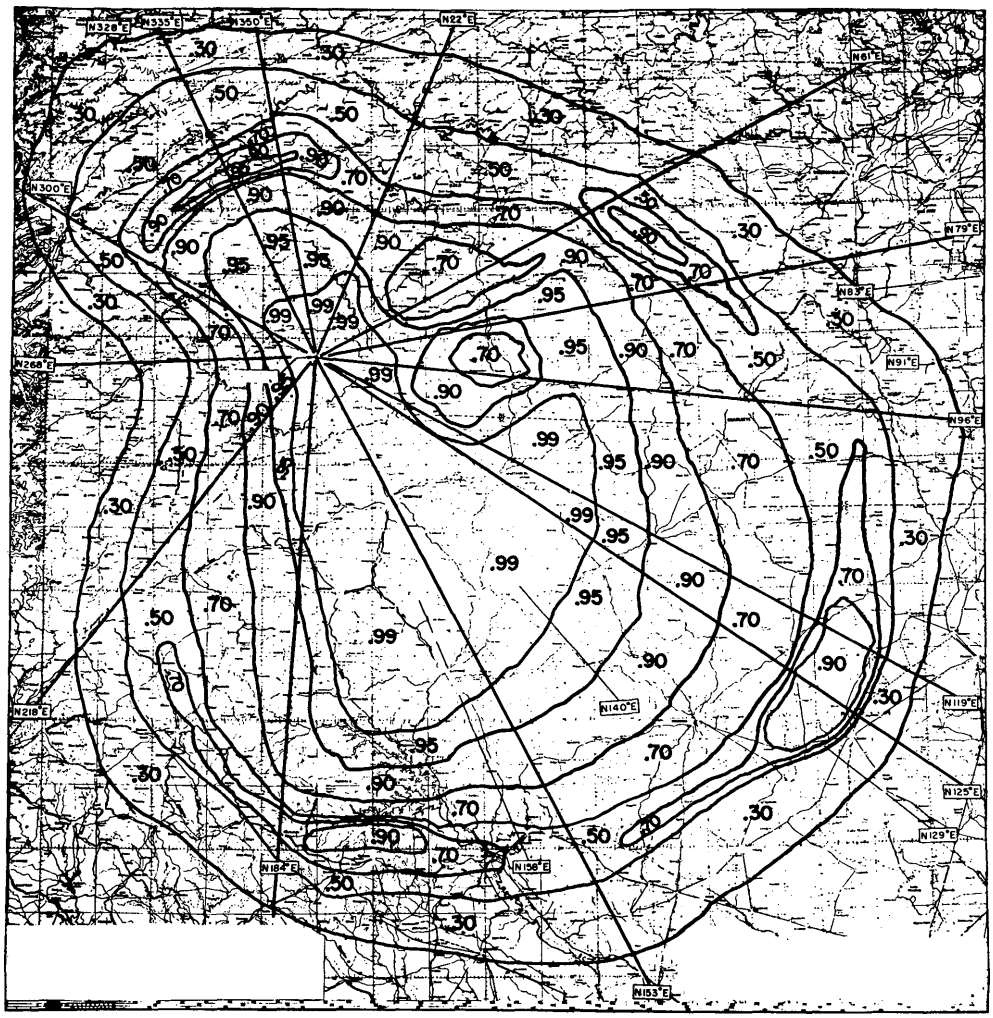


FIGURE 1

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

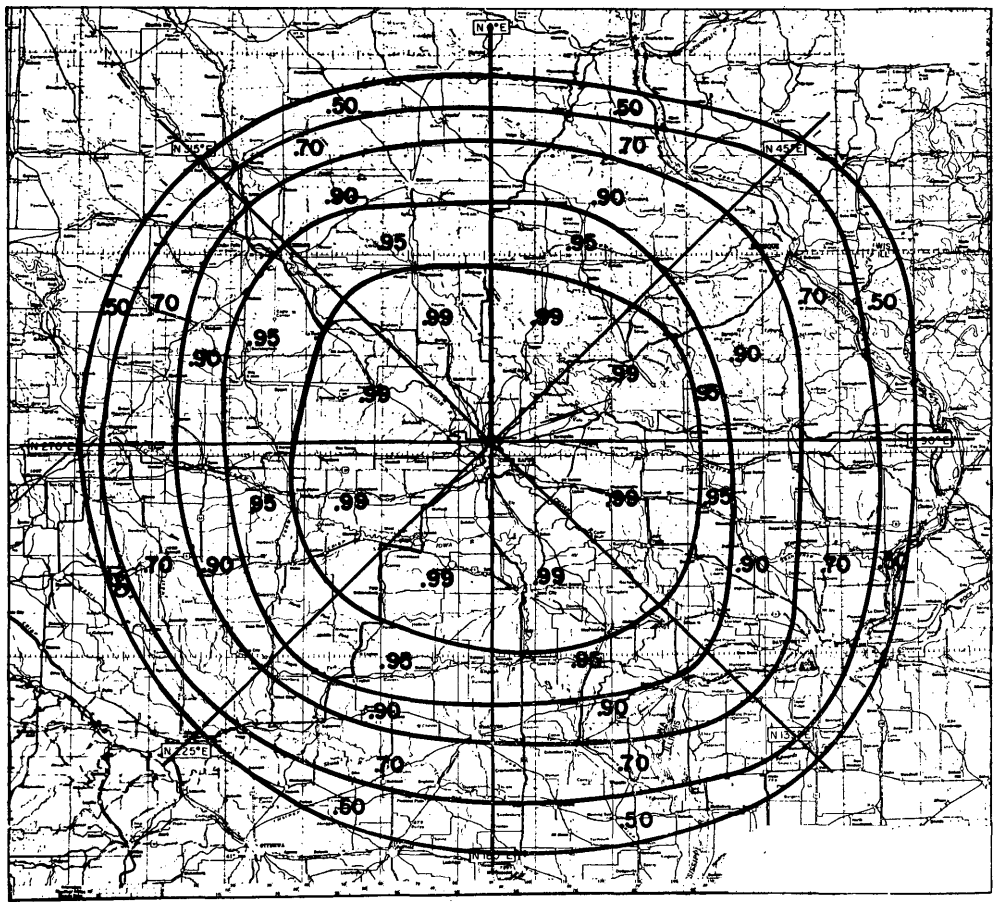


FIGURE 2

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

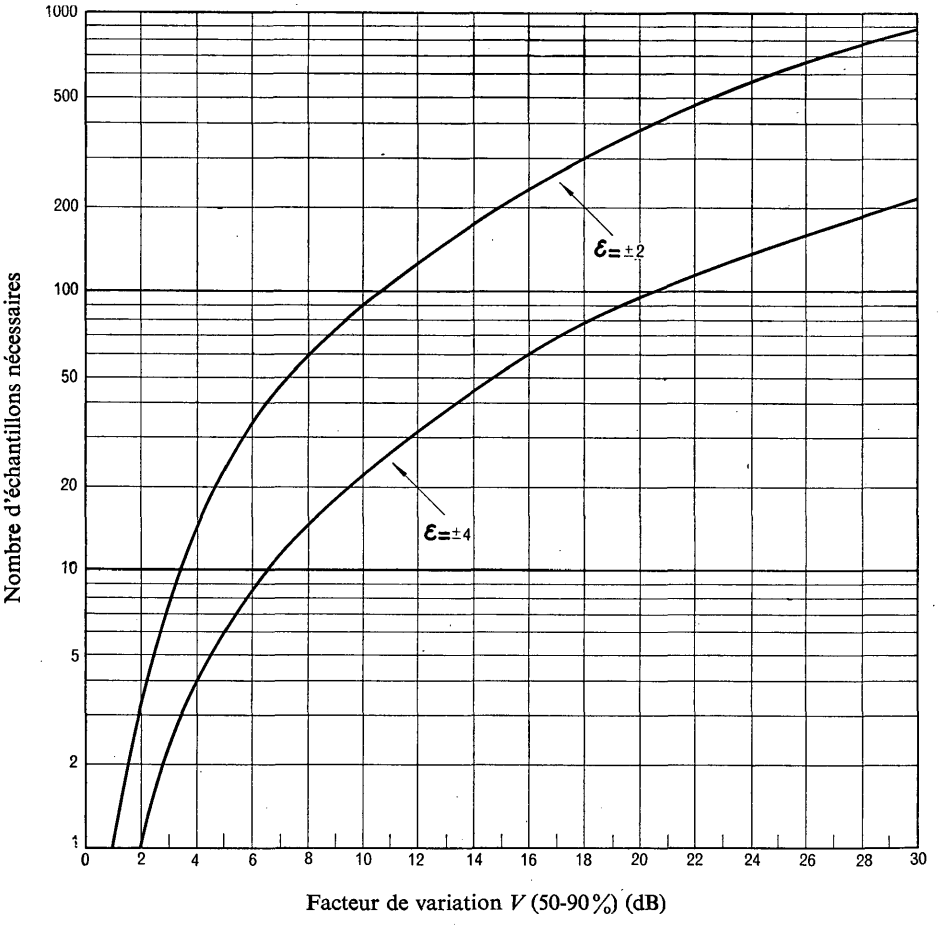


FIGURE 3

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

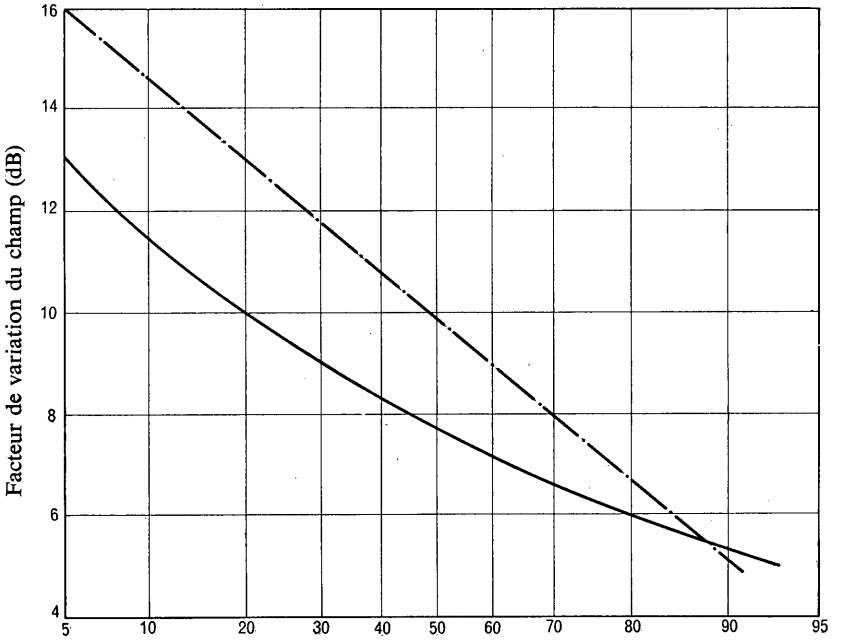


FIGURE 4

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

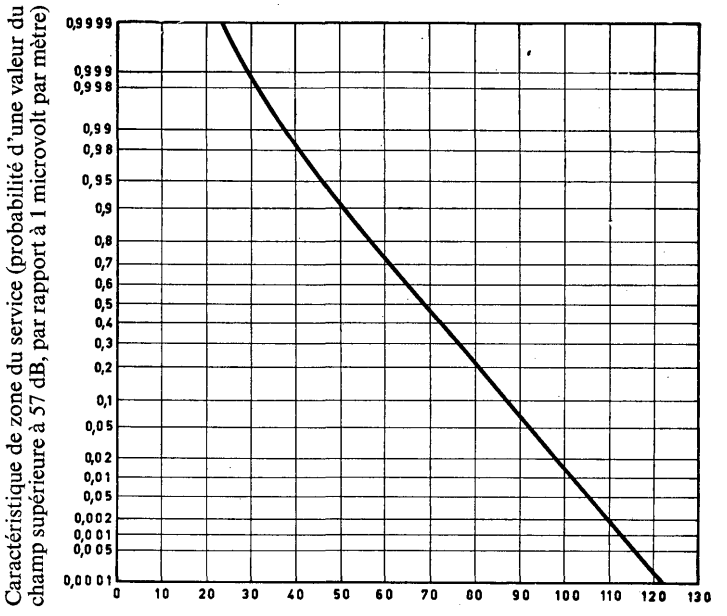


FIGURE 5

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 54-88 MHz

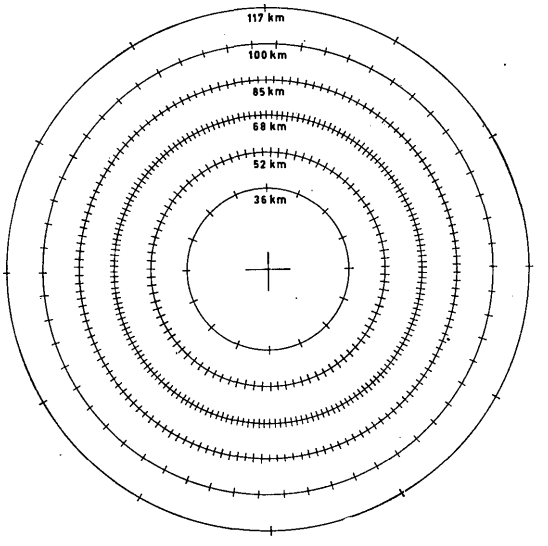


FIGURE 6

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 238-1 *

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON

(Programme d'études 5-1B-1/5)

(1959 - 1963 - 1970)

1. Généralités

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 réfléchie 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.

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 types 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.

Le Rapport 244-2 indique que l'affaiblissement de transmission à long terme par rapport à l'espace libre augmente comme la fréquence f. Cependant, des mesures faites en Suède [8] à 1 et 3 GHz indiquent que, lorsque la valeur médiane horaire de l'affaiblissement augmente, la loi en fréquence de l'affaiblissement de transmission, par rapport à l'espace libre, varie de façon continue de f^2 à $f^{-1/3}$.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

2. Influence 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 [9]; pour les liaisons de longueur moyenne, la différence est d'environ 15 dB. Les trajets maritimes sont plus susceptibles d'être affectés par la superréfraction et par les effets des couches élevées que les trajets terrestres; les variations sont donc plus importantes sur les trajets maritimes. Il se produit en outre des variations diurnes. L'affaiblissement est en général maximal dans l'après-midi [10].

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.

3. 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'instants d'émission. L'effet de la diversité d'espace a été étudié en République Fédérale d'Allemagne [6] 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

$$\Delta_y = 0{,}36\ (D^2 + 4L^2{}_y)^{1/2}$$
$$\Delta_z = 0{,}36\ (D^2 + L^2{}_z)^{1/2}$$

Des mesures ont conduit aux valeurs suivantes:

$$L_y \simeq 20 \text{ m}, \quad L_z \simeq 15 \text{ m}.$$

On peut encore employer la diversité de fréquence. On a trouvé [6] qu'une valeur convenable pour la différence de fréquence Δf (MHz) est:

$$\Delta f = (1{,}44\, f/\delta d)\,(D^2 + L^2{}_z)^{1/2}$$

expression dans laquelle f (MHz) est la fréquence porteuse, δ (milliradians) l'angle de diffusion au centre du volume commun et d (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 [2].

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 [11].

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.

4. Gain de l'antenne pour le trajet

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 « dégradation du gain » ou « perte par couplage entre l'antenne et le milieu ». L'analyse théorique [3] montre que la perte dépend du gain d'antenne et de la longueur du trajet. Certaines publications indiquent que cela se produit lorsque l'ouverture des faisceaux des antennes est plus petite que celle dans laquelle on pourrait obtenir la diffusion des signaux si l'on utilisait des antennes omnidirectives.

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 [7]. D'autre part, on peut considérer que le gain effectif total (Fig. 1) 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 50 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 [12].

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.

5. 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 [4, 5, 13], du point de vue de la fonction d'autocorrélation 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 [6], elle diminue légèrement lorsque les diamètres des antennes augmentent.

6. Largeur de bande transmissible

Les différences entre les temps de propagation des composantes du signal transmis par diffusion provoquent une distorsion de signal qui réduit la largeur de bande disponible pour la modulation. Certaines publications indiquent que cette largeur de bande est, en théorie inversement proportionnelle au cube de la distance et qu'elle augmente comme le gain de l'antenne. En fait, on a trouvé que les faisceaux hertziens, dont la longueur dépasse de beaucoup 500 km, peuvent ne pas fournir plus de 24 voies téléphoniques satisfaisantes.

7. 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'antennes 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° 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.

BIBLIOGRAPHIE

1. C.C.I.R. Doc. V/25 (République Fédérale d'Allemagne), 1966-1969.
2. C.C.I.R. Doc. V/114 (France), 1963-1966.
3. RICE, P. L., LONGLEY, A. G., NORTON, K. A. et BARSIS, A. P. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits. NBS Technical Note 101 (1965).
4. FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, F. 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 (1er mars 1966).
5. FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, F. Das Elektromagnetische Feld am Empfangsort einer troposphärischen Scatterstrecke, I und II (Le champ électromagnétique à la station de réception d'un faisceau hertzien transhorizon). *Nachr. Techn. Z.*, **20**, 511-520 et 649-657 (1967).
6. C.C.I.R. Doc. V/26 (République Fédérale d'Allemagne), 1966-1969.
7. BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. Etude expérimentale de la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Annales des télécommunications* (septembre-octobre 1964).
8. EKLUND, F. et WICKERTS, S. Wavelength dependence of microwave propagation far beyond the radio horizon, *Radio Science* **3**, 11 (novembre 1968).
9. C.C.I.R. Doc. V/140 (U.R.S.S.), 1966-1969.
10. C.C.I.R. Doc. V/142 (O.I.R.T.), 1966-1969.
11. SURENIAN, D. Experimental results of angle diversity system tests. *IEEE Trans. Com. Tech.*, COM-**13**, **2**, 208 (juin 1965).
12. C.C.I.R. Doc. V/133 (France), 1966-1969.
13. GROSSKOPF, J. et FEHLHABER, L. Häufigkeit und Dauer einzelner Schwundeinbrüche bei troposphärischen Scatterstrecken. (Fréquence et durée des évanouissements profonds sur les liaisons par diffusion troposphérique). *Nachr. Techn. Z.*, **2**, 71 (1962).

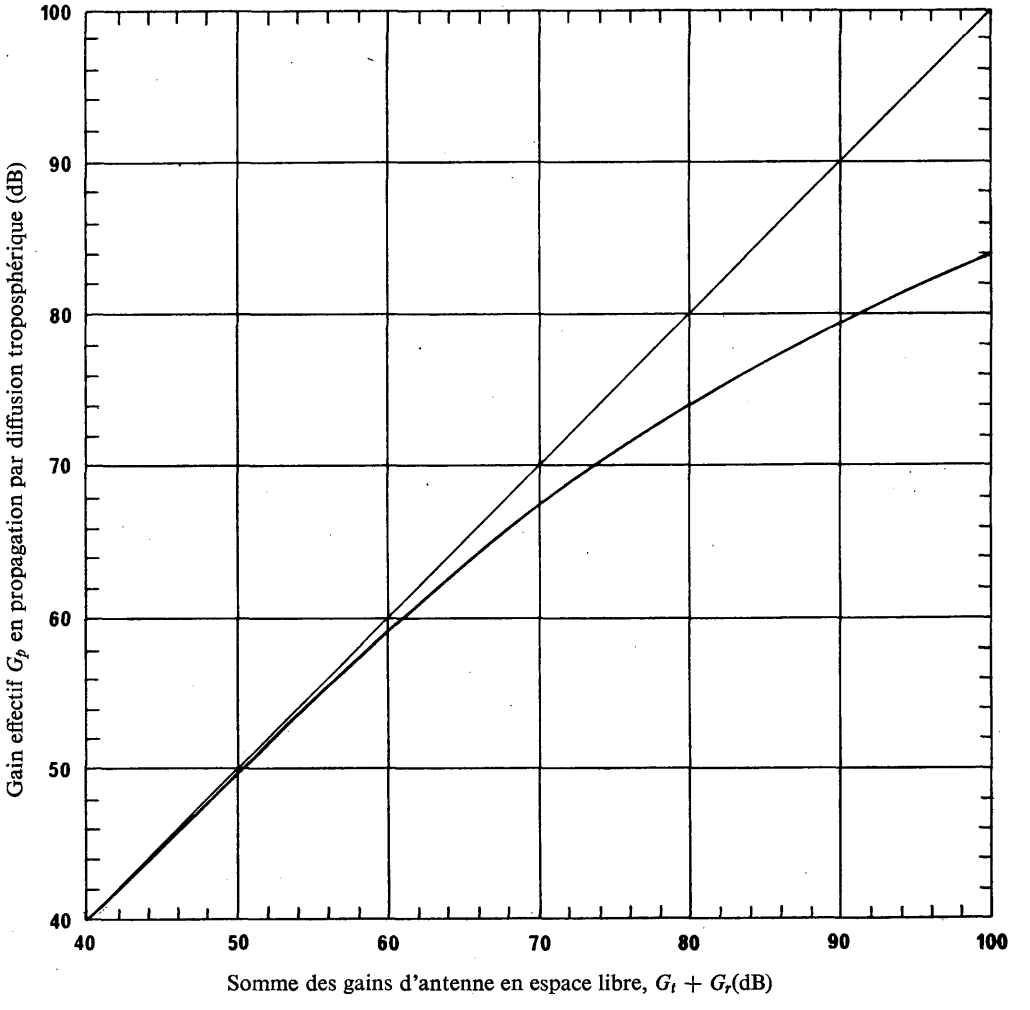

Gain effectif G_p en propagation par diffusion troposphérique (dB)
100
90
80
70
60
50
40
40
50
60
70
80
90
100
Somme des gains d'antenne en espace libre, $G_t + G_r$(dB)

FIGURE 1

RAPPORT 239-2 *

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

(Programme d'études 7A/5)

(1959 - 1963 - 1966 - 1970)

1. Introduction

Le présent Rapport donne des indications sur la construction et l'usage des courbes de propagation de l'Avis 370-1, il comprend des résultats statistiques descriptifs relatifs au gain de hauteur des antennes et aux phénomènes de dépolarisation: il examine aussi l'influence des zones urbaines et de la végétation sur la propagation. Dans la dernière section est suggérée 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 236-2, 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 effectives. 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 international créé aux termes de la Résolution 2, a été ~~récemment~~ publié [1].

Des résultats de mesure du champ ont été communiqués par de nombreuses administrations; ces résultats ont été combinés pour établir les courbes de propagation [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. 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 dans ~~le~~ présent document.

Le présent Rapport repose sur les définitions suivantes:

1.1 Les valeurs du champ ont été ajustées de façon à correspondre 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.

---

* Ce Rapport a été 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.

2. Distances supérieures à celle de l'horizon

Les données à long terme relatives aux distances supérieures à celle de l'horizon sont 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 sur la base de ces données.

La Fig. 1 représente les courbes pour la propagation sur 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, 2, 3 et 4 de l'Avis 370-1. Les portions des courbes correspondant aux courtes distances, à la Fig. 4 de l'Avis 370-1, 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 analogues pour la propagation sur les 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 370-1.

Il convient toutefois d'attirer l'attention sur des mesures faites par l'O.I.R.T. [28] pendant une période de trois ans sur des transmissions suivant cinq trajets en Europe centrale, à une fréquence de 1100 MHz. Une importante conclusion à tirer de ces travaux est que la variance du champ entre plusieurs trajets est considérablement supérieure à celle indiquée par l'Avis 370-1 et aussi par le Rapport 244-2. 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 370-1 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 (450-1000 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.

Des courbes relatives à des hauteurs d'antenne émettrice, autres que celles de l'Avis 370-1, 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. 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 les canaux communs 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.

Quelques mesures de champ, effectuées en région méditerranéenne, montrent que les valeurs médianes tendent à être plus élevées que celles observées dans la région de la mer du Nord, et que les valeurs de champ dépassées pendant de faibles pourcentages du temps sont nettement plus élevées [45].

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 μV/m pendant approximativement 2% de l'année [29].

Des mesures de champ faites en Suède pendant des périodes allant de 3 mois à 4 ans, sur trois trajets de transmission à ondes métriques et deux trajets à ondes décimétriques dans la région de la mer Baltique [39] ont donné des résultats qui concordent avec les valeurs indiquées dans l'Avis 370-1 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.

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 370-1 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 voie de comparaison avec les courbes théoriques pour une terre régulière. Ces courbes ont ensuite été raccordées de façon satisfaisante avec les familles de courbes correspondantes pour les distances supérieures à celle de l'horizon, décrites dans la section précédente. La Fig. 1 de l'Avis 370-1 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. 2 et 3 de l'Avis 370-1 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 370-1) peuvent servir de guide pour les petites distances et peuvent être raccordées avec les courbes 10% et 1% des Fig. 2 et 3.

Les champs à courte distance indiqués à la Fig. 4 de l'Avis 370-1, qui représente les courbes pour la propagation dans la bande des ondes métriques sur des trajets maritimes avec dépassement pendant 1% du temps, ont été établis dans une hypothèse correspondante, à savoir, que les champs à 1% pour la propagation terrestre ou maritime ne seraient pas 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 370-1 pour des trajets terrestres et aux Fig. 13, 14, 15 et 16 pour des trajets maritimes.

4. Influence des irrégularités du terrain

Lorsque les emplacements de réception de radiodiffusion sont déterminés 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 la concordance de phase néfaste entre la propagation en visibilité directe et les ondes radioélectriques 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 122-1 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 [46] ont montré qu'aux emplacements se trouvant à l'ombre, 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 des altitudes dépassées sur 10% et 90% du terrain, sur les trajets de propagation entre 10 et 50 km de distance de l'émetteur (voir la Fig. 7 de l'Avis 370-1). 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 valeur à long terme 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 370-1) pour la propagation des ondes métriques sur un terrain vallonné typique caractérisé par $\Delta h = 50$ m.

On admet également que les changements de la gamme de variation de cette répartition en fonction des emplacements — c'est-à-dire la pente de la courbe de répartition — est, en première approximation, indépendante 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 370-1) est applicable pour la plupart des valeurs constantes de Δh.

La Fig. 12 de l'Avis 370-1 indique les distributions typiques d'emplacements pour plusieurs valeurs de Δh, pour les bandes d'ondes décimétriques; on n'a pas le droit d'admettre que les changements de la gamme de variation sont négligeables.

En plus de l'augmentation de la gamme 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 Tchécoslovaque et au Royaume-Uni ont confirmé que les corrections indiquées dans les Fig. 8*a* et 8*b* de l'Avis 370-1 sont valables pour des distances allant jusqu'à 100 km, cela dans les bandes III, IV et V [2, 3].

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. 8*a* et 8*b* de l'Avis 370-1 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.

Aucun facteur de correction de l'affaiblissement n'est proposé jusqu'à présent pour les bandes inférieures à la bande III.

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 de 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 [4], 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 [5], selon une variante de la méthode TASO [6]; 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 [3], 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 [41].

4.1.4 Une méthode employée au Japon [40] 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 qu'il faut faire pour tenir compte des accidents de terrain, et aux corrections des effets de surface.

4.1.5 Les différentes méthodes de détermination décrites ci-dessus sont toutes fondées, soit sur les modifications du champ calculées 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 [41], 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 [7, 8, 9, 27] 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 [40] 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.

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 médian 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 370-1.

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 [10, 11, 12] les champs observés à une hauteur de 10 m dans les zones suburbaines sont à peu près équivalents à ceux que l'on obtient dans les régions rurales [10, 12]. Des travaux faits en République Populaire de Pologne ont montré que les valeurs de l'affaiblissement maximal au centre d'une zone urbaine étaient les suivantes: dans une zone urbaine de 400 000 habitants [10, 11], 16 dB à 10 m et 6 dB à 16 m (niveau moyen des toits), et dans une zone urbaine de 80 000 habitants [12], 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. En ce qui concerne les ondes décimétriques, des travaux effectués récemment au Royaume-Uni [13] ont révélé un affaiblissement médian de 9 dB pour les zones urbaines, dans le sud-est de l'Angleterre. Des expériences effectuées en Italie [30] 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 *Interpolation des courbes de champ pour le service mobile terrestre*

Les courbes de champ de l'Avis 370-1 sont directement applicables dans le service de radiodiffusion, les antennes de réception se trouvant à une hauteur de 10 m au-dessus du niveau du sol. Pour le service mobile terrestre, les antennes de réception étant généralement à une hauteur d'environ 3 m au-dessus du niveau du sol, la valeur médiane du champ reçu sera, en conséquence, réduite.

Dans les zones rurales, l'interpolation peut se faire simplement. Il convient de soustraire du champ prévu par les courbes la valeur du gain de hauteur donnée au § 4.2.1. Dans les zones urbaines, l'interpolation est plus difficile. Les valeurs du gain de hauteur données au § 4.2.1 doivent être soustraites des champs prévus par les courbes; ensuite, on doit procéder à une correction par un facteur de densité de construction, pour les raisons données au § 4.2.2. Les facteurs de correction combinés à soustraire du champ donné par les courbes de l'Avis 370-1 sont indiqués au Tableau I ci-dessous.

TABLEAU I

	Bandes I, II	Bande III	Bandes IV, V
Zone rurale (dB)	9	7	Valeur donnée par la Fig. 4 pour $d < 50$ km
Zone urbaine (dB)	9	11	14

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, elles doivent être réduites de 50%. Pour les distances intermédiaires, il convient de procéder à une interpolation linéaire.

Des mesures effectuées 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 [41]. On peut utiliser cette valeur pour évaluer le champ médian dans les bandes IV et V, par application du facteur de correction indiqué au Tableau I, les antennes de réception se trouvant à une hauteur de 1,5 m dans les zones urbaines.

Des mesures du champ effectuées dans des régions rurales de la République Populaire de Pologne [47] sur des fréquences comprises entre 34 MHz et 306 MHz sont tout à fait conformes à l'Avis 370-1, compte tenu, le cas échéant, d'une modification imputable aux effets du terrain selon les indications données dans le présent rapport. Des mesures effectuées sur la même gamme de fréquences dans les zones urbaines montrent que la dispersion du champ semble être pratiquement indépendante de la fréquence [48].

4.2.4 *Antennes sur le toit et antennes intérieures*

Dans une étude récente [14], 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 [42].

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. Pour les systèmes de télécommunication, il est parfois plus commode de considérer la discrimination de polarisation que l'on obtient avec une antenne fonctionnant dans un milieu donné. En général, ces facteurs sont exprimés en décibels et, dans la pratique, ils sont de valeur égale mais avec des signes opposés à condition que le facteur de polarisation ne soit pas trop petit.

4.3.1 *Services de radiodiffusion*

Si l'émetteur se trouve en terrain dégagé, la discrimination de polarisation obtenue au niveau des toits dans une zone urbaine, grâce à l'emploi de polarisation orthogonale, 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 122-1). La discrimination est meilleure en terrain découvert et moins bonne en des points de réception encombrés d'obstacles, ou lorsque les conditions de réception sont médiocres.

Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne sur 520 et 700 MHz [16] 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 [15] ont montré qu'avec une antenne polarisée verticalement et orientée à 180° d'une onde incidente polarisée horizontalement, la discrimination dépasse de 6 dB le rapport avant/arrière (16 dB) de l'antenne.

L'Administration de la République Socialiste Tchécoslovaque [25, 27] 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 II.

TABLEAU II

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 II 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 de la densité de construction des bâtiments est négligeable. Le Tableau III montre quelle est l'influence des variations du paramètre Δh.

TABLEAU III

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

4.3.2 *Services mobiles*

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 [43].

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 30-1000 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.

4.4 *Affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments*

Un document [32] montre comment l'affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments varie avec la fréquence. Ce document résume les données déjà publiées couvrant toute une gamme de caractéristiques de végétation [33, 34, 35, 36, 37, 38] et les résultats obtenus sont présentés à la Fig. 5.

Des études plus récentes effectuées au Japon [40] 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 [42] 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 [42], 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 [31] 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 à l'ombre. D'autres mesures [46], effectuées à des emplacements à l'ombre, sur 97 MHz, ont montré que cette différence était de 5 dB avec un écart de ±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

Il ne semble pas exister de différences significatives entre la propagation sur les trajets maritimes et sur les trajets terrestres dans les bandes I, II et III, sauf pour les faibles pourcentages du temps; en revanche, ces différences sont importantes dans les bandes IV et V.

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.

Depuis la X[e] Assemblée plénière du C.C.I.R., Genève, 1963, on a mis au point, au Royaume-Uni, une méthode améliorée de calcul du champ au-dessus d'un trajet mixte; bien étayée par des mesures, cette méthode n'est pas sujette aux restrictions qui limitaient l'application de la méthode précédente. La nouvelle méthode [17] est illustrée par les courbes de la Fig. 6 qui indiquent le champ des ondes décimétriques sur des trajets maritimes A et 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 au-dessus de 1 μV/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 au-dessus de 1 μV/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 au-dessus de 1 μV/m.

Recommençons le même processus dans le sens inverse. Après 100 km de trajet terrestre, la courbe B indique un champ de 35 dB au-dessus de 1 μV/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 au-dessus de 1 μV/m. La moyenne des deux résultats est donc:

$$E = (1/2)\,(28{,}8+21) \approx 25 \text{ (dB au-dessus de 1 } \mu\text{V/m)}$$

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 sont actuellement les plus satisfaisantes pour le calcul du champ sur un trajet mixte terre-mer. Toutefois, des études faites récemment au Royaume-Uni [44] ont montré que, si la concordance est bonne quand le trajet terrestre est court par rapport au trajet maritime, elle est en revanche médiocre pour la plupart des trajets terrestres; les valeurs mesurées sont nettement inférieures aux valeurs calculées.

Il est possible que cette différence soit due au fait que les propriétés temporelles de la propagation anormale ne sont pas les mêmes sur des trajets terrestres et des trajets maritimes. Il est nécessaire que de nouvelles études soient entreprises d'urgence pour vérifier l'exactitude de cette explication, avant de pouvoir soumettre au C.C.I.R. de nouvelles propositions concernant les calculs à effectuer pour les trajets mixtes terre-mer.

BIBLIOGRAPHIE

1. RICE, P.L., LONGLEY, A.G., NORTON, K.A. et BARSIS, A.P. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits. NBS Technical Note 101 (7 mai 1965).
2. C.C.I.R. Doc. V/38 (O.I.R.T.), 1963-1966.
3. U.E.R. Monographie C (1965).
4. C.C.I.R. Doc. V/24 (République Fédérale d'Allemagne), 1963-1966.
5. C.C.I.R. Doc. V/28 (République Populaire de Pologne), 1963-1966.
6. LAGRONE, A. H. Forecasting television service fields. *Proc. IRE*, Vol. 48, **6**, (juin 1960).
7. C.C.I.R. Doc. V/4 (Etats-Unis), 1963-1966.
8. UHLEN, N. *Tele I*, 1962. Fältstyrkemätningar och räckviddsbestämning för radioanläggningar. (Mesures du champ et calculs de la gamme de couverture pour stations radioélectriques (en suédois)).
9. C.C.I.R. Doc. V/39 (O.I.R.T.), 1963-1966.
10. C.C.I.R. Doc. V/34 (République Populaire de Pologne), 1963-1966.
11. C.C.I.R. Doc. V/35 (République Populaire de Pologne), 1963-1966.
12. C.C.I.R. Doc. V/51 (République Populaire de Pologne), 1960-1963.
13. C.C.I.R. Doc. V/9 (Royaume-Uni), 1963-1966.
14. C.C.I.R. Doc. V/2 (Etats-Unis d'Amérique), 1963-1966.
15. C.C.I.R. Doc. V/19 (Royaume-Uni), 1963-1966.
16. C.C.I.R. Doc. V/43 (République Fédérale d'Allemagne), 1963-1966.
17. C.C.I.R. Doc. V/20 (Royaume-Uni), 1963-1966.
18. KÜHN, U. 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). *Technische Mitteilungen B.R.F.* (R.D.A.) (février et mai 1958).
19. FINE, H. UHF Propagation within line-of-sight, *FCC Report T.R.R.*, 2. 4. 12.
20. SAXTON, J.A. Basic ground-wave propagation characteristics in the frequency band 50-800 MHz. *Proc. I.E.E.*, **101**, Part III, 211 (1954).
21. SAXTON, J.A. et HARDEN, B.N. Ground-wave field-strength survey at 100 and 660 MHz. *Proc. I.E.E.*, **101**, Part III, 215 (1954).
22. KIRKE, H.L. et autres. A VHF field-strength survey on 90 MHz. *Proc. I.E.E.*, **98**, Part III, 343 (1951).
23. Report of Television Allocations Study Organization to the Federal Communications Commission (1959).
24. C.C.I.R. Doc. V/34 (Royaume-Uni), 1960-1963.
25. C.C.I.R. Doc. V/207 et V/208 (O.I.R.T.), 1963-1966.
26. KRÁLIK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. 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 Tchécoslovaque)). *Techn. Mitteilungen des B.R.F.*, Vol. 5, **4**, 174 (décembre 1961) et *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, **1**, 18 (mars 1962).
27. KRÁLIK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. 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 (1962).
28. C.C.I.R. Doc. V/117 (O.I.R.T.), 1963-1966.
29. MISME, P. Propagation transhorizon à très grandes distances au-dessus de l'Atlantique intertropical. *Annales des télécommunications* (1966).
30. C.C.I.R. Doc. V/99 (Italie), 1963-1966.
31. C.C.I.R. Doc. V/121 (République Fédérale d'Allemagne), 1963-1966.
32. C.C.I.R. Doc. V/89 (Royaume-Uni), 1963-1966.
33. SAXTON, J.A. et LANE, J.A. VHF and UHF reception. *Wireless World*, **61**, 229 (1953).
34. LAGRONE, A.H. Height-gain measurements at VHF and UHF behind a grove of trees. *IEEE Trans.*, **BC-9**, 37 (1963).
35. LAGRONE, A.H. et CHAPMAN, C.W. Some propagation characteristics of high UHF signals in the immediate vicinity of trees. *IRE Trans.*, **AP-9**, 487 (1961).
36. HERBSTREIT, J.W. et CRICHLOW, W.Q. Measurement of the attenuation of radio signals by jungles. *Radio Science*, **68 D**, 903 (1964).

37. JOSEPHSON, B. et BLOMQUIST, A. The influence of moisture in the ground, temperature and terrain on ground-wave propagation in the VHF band. *IRE Trans.*, **AP-6**, 169 (1958).
38. HEAD, H.T. The influence of trees on television field strengths at UHF. *Proc. IRE*, **48**, 1016 (1960).
39. C.C.I.R. Doc. V/30 (Suède), 1966-1969.
40. KINASE, A. Influence of terrain irregularities and environmental clutter surrounding on the propagation of broadcasting waves in the UHF and VHF bands. *N.H.K. Technical Monograph*, **14**, Japon (mars 1969),
41. OKUMARA, A. et autres. Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Review of Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, **9-10** (septembre-octobre 1968).
42. SOFAER, E. et BELL, C.B. Factors affecting the propagation and reception of broadcasting signals in the UHF bands. *Proc. I.E.E.*, Vol. 113, 7 (juillet 1966).
43. C.C.I.R. Doc. V/31 (Suède), 1966-1969.
44. C.C.I.R. Doc. V/14 et Doc. V/16 (Royaume-Uni), 1966-1969.
45. C.C.I.R. Doc. V/134 (France), 1966-1969.
46. C.C.I.R. Doc. V/103 (République Fédérale d'Allemagne), 1966-1969.
47. C.C.I.R. Doc. V/137 (République Populaire de Pologne), 1966-1969.
48. C.C.I.R. Doc. V/136 (République Populaire de Pologne), 1966-1969.

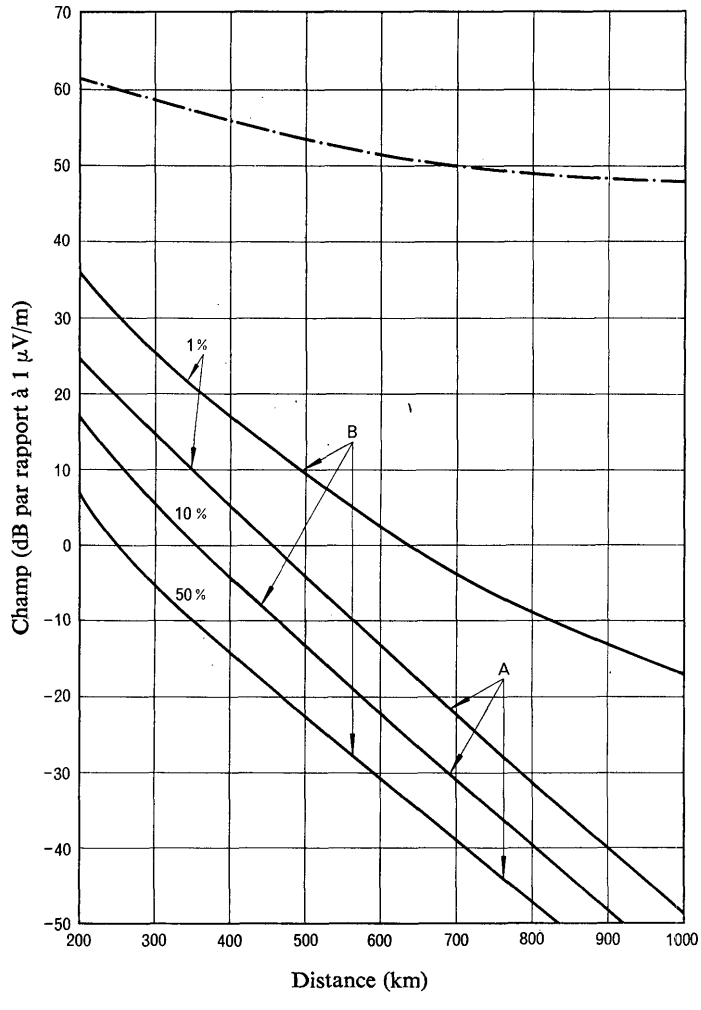


FIGURE 1

Champ (dB par rapport à 1 μV/m) pour 1 kW de p.a.r. Fréq. 30-250 MHz (Bandes I, II et III) ; 50% des emplacements ; h_1 = 300 m ; h_2 = 10 m ; le pourcentage du temps est indiqué sur la courbe

Courbe A : Terre

Courbe B : mer du Nord

———— Espace libre

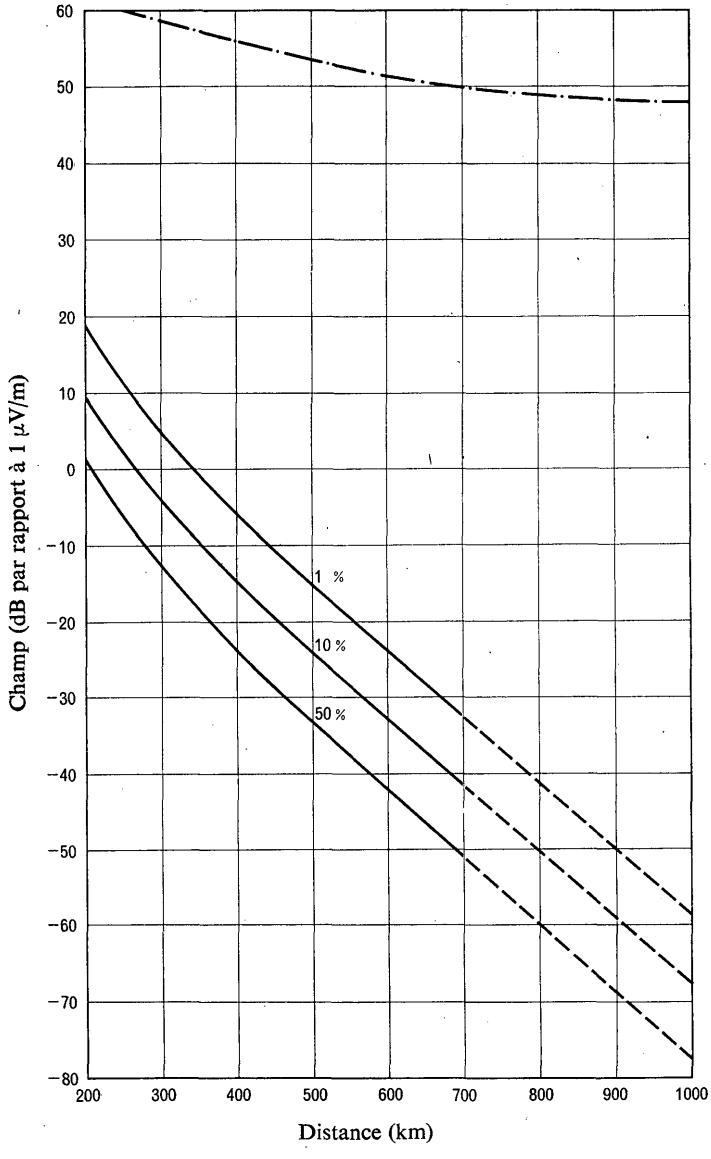


FIGURE 2

Champ (dB par rapport à 1 μV/m) pour 1 kW de p.a.r. Fréq. 450-1000 MHz (Bandes IV et V) ; 50% des emplacements ; h_1 = 300 m ; h_2 = 10 m ; Terre ; le pourcentage du temps est indiqué sur la courbe

—·—·—·— Espace libre

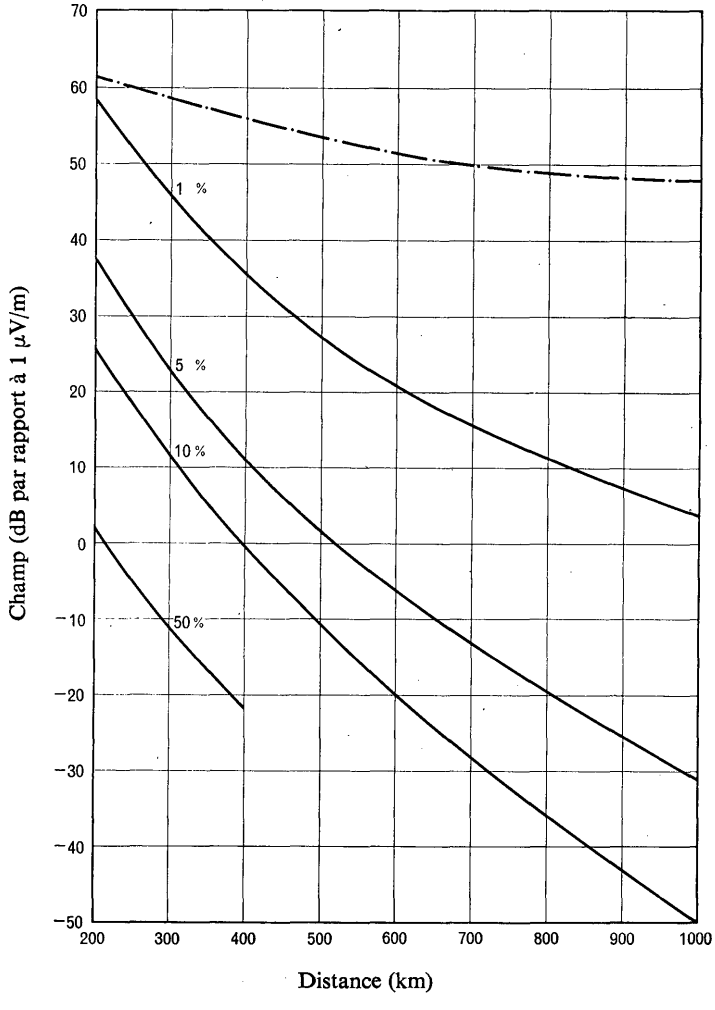


FIGURE 3

Champ (dB par rapport à 1 μV/m) pour 1 kW de p.a.r. Fréq. 450-1000 MHz (Bandes IV et V); pour les pourcentages du temps indiqués sur les courbes; pour 50% des emplacements de réception; $h_1 = 300$ m; $h_2 = 10$ m; mer

———— Espace libre

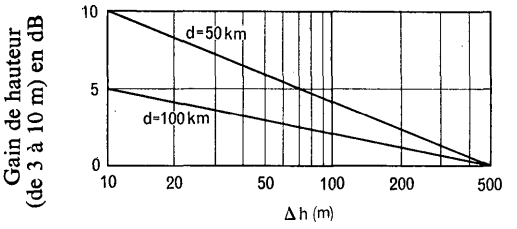


FIGURE 4

Facteur de gain de hauteur (de 3 à 10 m) en fonction de Δh pour des fréquences de 450-1000 MHz (Bandes IV et V) ; d est la distance à l'émetteur

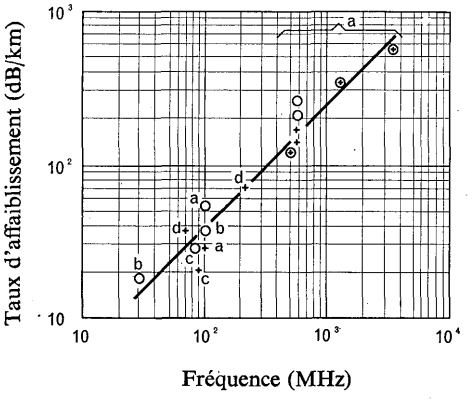


FIGURE 5

Affaiblissement dû aux bois ou aux broussailles en fonction de la fréquence

(a) Arbres ayant toutes leurs feuilles [33]
(b) Bois avec broussaille dense [37]
(c) Jungle tropicale [36]
(d) Arbres ayant toutes leurs feuilles [34]
o Polarisation verticale
\+ Polarisation horizontale

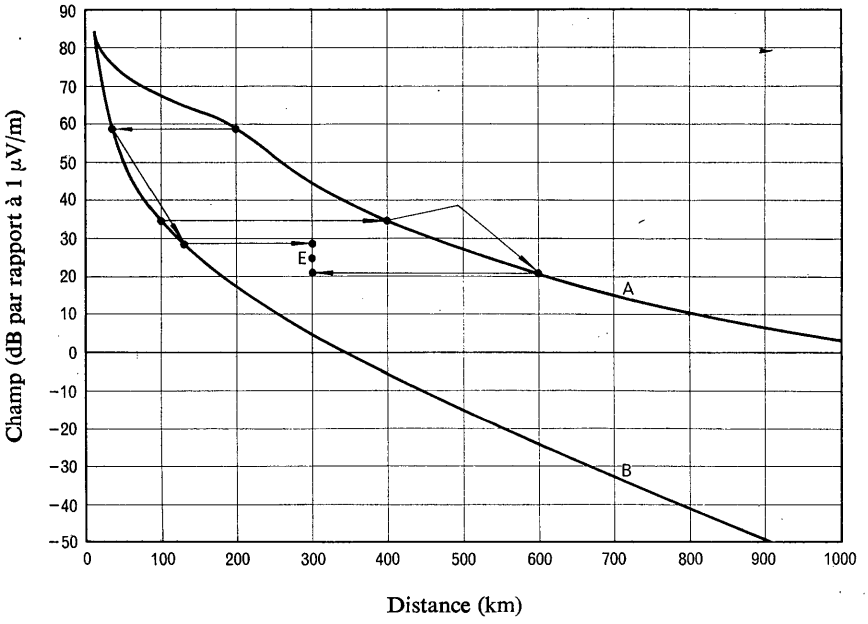


FIGURE 6

Méthode permettant d'évaluer le champ sur un trajet mixte terrestre et maritime

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 241-1 *

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS

Collecte de données

(Programmes d'études 5-1A-1/5 et 5-1B-1/5)

(1959 – 1963 – 1966)

En réponse à la Circulaire administrative AC/63, un grand nombre de données relatives aux Programmes d'études 5-1A-1/5 et 5-1B-1/5 ont maintenant été recueillies. On estime que ces résultats, qui sont ceux de mesures effectuées par un certain nombre d'administrations sur des trajets de longueurs très variables et dans des régions de climats très différents, présentent un grand intérêt pour l'établissement de systèmes de faisceaux hertziens; ces données peuvent être obtenues auprès du Secrétariat du C.C.I.R. Les résultats se répartissent en deux sections d'un même volume, l'une contenant des données relatives à des trajets ayant une distance angulaire négative (trajets « à visibilité directe »), l'autre à des trajets dont la distance angulaire est positive (trajets « au-delà de l'horizon »). Le volume dont il s'agit est intitulé: « Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens (Programmes d'études 5 A/V et 5 B/V) » publié par l'Union internationale des télécommunications, Genève, 1965.

Il importe de recevoir encore d'autres données, concernant surtout les régions autres que celles de la zone tempérée, et les administrations sont instamment invitées à procéder à des mesures permettant d'obtenir les données nécessaires.

L'attention est attirée sur le fait que les données fournies ne sont utilisables que si les paramètres suivants, au moins, sont fournis: longueur du trajet, fréquence, hauteur et gain des antennes, angles de site à chaque extrémité sur une terre ayant un rayon équivalent égal aux $^4/_3$ du rayon réel (pour les trajets au-delà de l'horizon) et constante de temps de l'enregistreur.

RAPPORT 244-2 *

ESTIMATION DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION DE L'ONDE TROPOSPHÉRIQUE

(1963 – 1966 – 1970)

1. Introduction

Les Programmes d'études 5-1A-1/5, 5-1B-1/5 et 5-1D-1/5 indiquent quels sont les besoins en matière de données sur la propagation et demandent qu'une analyse de ces données soit faite pour les fréquences comprises entre 40 MHz et un minimum de 20 GHz, en vue de la planification des systèmes de faisceaux hertziens et de la détermination des possibilités de partage des fréquences entre les systèmes, y compris les systèmes de télécommunication spatiale et terrestre. Ces données sont fournies en réponse à la demande formulée par le Directeur du C.C.I.R. dans la Circulaire administrative AC/63. Plusieurs administrations ont proposé des méthodes pour l'estimation de l'affaiblissement de transmission, en deçà et au-delà de l'horizon, dans une large gamme de fréquences et pour différents climats [1, 2].

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

Un Groupe de travail intérimaire a été formé avec mission de poursuivre les travaux de compilation et d'analyse des données, conformément à la Résolution 2-1. Ce rapport préliminaire récapitule les données fournies jusqu'à présent par un certain nombre d'administrations, pour la gamme de fréquences de 40 MHz à 10 GHz. Il décrit des procédures provisoires à utiliser pour l'estimation de l'affaiblissement de transmission de l'onde troposphérique et pour l'étude des variations de cet affaiblissement dans certaines zones de climat.

Certaines administrations ont reconnu que la procédure décrite dans le § 2 est utile pour les prévisions de l'affaiblissement de transmission de l'onde troposphérique; l'une des références bibliographiques [1] décrit une méthode de calcul complète et détaillée, sur laquelle cette procédure est basée. Une autre méthode est décrite dans le § 3. Il n'a pas été possible de réaliser un accord unanime quant aux méthodes les plus appropriées à utiliser en toutes circonstances, et il est clair qu'il faudra poursuivre les travaux avant que le Groupe de travail intérimaire puisse établir un rapport plus complet.

Il est souhaitable que les diverses administrations qui s'intéressent à cette question fassent des comparaisons entre les données expérimentales qu'elles auront obtenues elles-mêmes et les méthodes de prévision mentionnées dans le présent Rapport, ainsi que des comparaisons avec toutes autres méthodes possibles; il conviendrait que ces administrations soumettent leurs conclusions au Groupe de travail intérimaire, par l'intermédiaire du Directeur du C.C.I.R.

Il n'existe pas de méthode capable d'assurer des prévisions exactes en toutes circonstances, et, pour certains trajets entre points fixes, on peut commettre exceptionnellement des erreurs atteignant plusieurs dizaines de décibels dans l'estimation de l'affaiblissement de transmission qui n'est pas dépassé pendant 0,1 % et 0,01 % du temps (champs très élevés). Il convient de signaler, cependant, que les mesures doivent être faites pendant une très longue période si l'on veut obtenir des prévisions empiriques sensiblement meilleures.

2. Calculs de l'affaiblissement de transmission

2.1 *Propagation en espace libre*

Dans l'Avis 341-1 et le Rapport 112, on trouve la relation suivante entre la puissance disponible P à l'antenne de réception, la puissance rayonnée totale P_r et l'affaiblissement de transmission L, l'affaiblissement de transmission de référence L_b et le gain d'antenne pour un trajet donné G_p

$$P = P_r - L \tag{1a}$$

$$L_b = L + G_p \tag{1b}$$

L'affaiblissement par rapport à l'espace libre A, est défini par:

$$A = L_b - L_{bf} \text{ (dB)} \tag{2}$$

$$L_{bf} = 32{,}45 + 20 \log f_{MHz} + 20 \log r_{km} \tag{3}$$

où L_{bf} est l'affaiblissement de transmission de référence dans l'espace libre et r la distance en ligne droite entre les antennes. Dans le présent Rapport, les distances sont exprimées en km et les angles en radians.

Note. — Il peut être pratique de représenter une équation de cette forme par un nomogramme (voir Fig. 15).

Pour les liaisons Terre-espace, il importe de connaître l'affaiblissement par rapport à l'espace libre $A(q)$ entre la station terrienne et la station spatiale, en fonction de la durée de service satisfaisant q, de la distance r_0, de la fréquence f et de l'angle de site θ_0, en prenant en considération l'affaiblissement dû aux précipitations et aux gaz de l'atmosphère [1]. Ceci est discuté en détail dans le Rapport 234-2.

En espace libre, compte non tenu de l'absorption, l'affaiblissement de transmission calculé s'exprime par:

$$L = L_{bf} - G_t - G_r \text{ (dB)} \tag{4}$$

où G_t et G_r désignent les gains des antennes d'émission et de réception en espace libre, exprimés en décibels par rapport au gain d'un radiateur isotrope.

2.2 *Propagation en visibilité directe*

Pour une surface lisse et parfaitement conductrice, l'affaiblissement, par rapport à l'espace libre, est donné par:

$$A = -6 - 10 \log \sin^2 (\pi \Delta r/\lambda) \text{ (dB)} \quad (5)$$

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 233-2).

Pour les petits angles d'indicence, ψ, et pour des antennes situées à h_1 et h_2 (km) au-dessus de la surface terrestre, on a:

$$\Delta r \approx 2\, h_1' h_2'/d \quad (6)$$

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:

$$\Delta r = d(\sec \psi - 1) \quad (7)$$

La distance maximale $d = d_0$ pour laquelle $A = 0$, peut être déterminée graphiquement d'après la relation

$$2h_1^2/d_0 - h_1\, d_0/(2a) + d_0^3\,(32a^2) = \lambda/6 \quad (8)$$

la somme des champs de l'onde directe et de l'onde réfléchie 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 $h_1 \leqslant h_2$, $h_1 \leqslant (9a\,\psi^2)/2$ et d'autre part que ψ est petit. On a alors

$$\Delta r \approx 2h_1 \sin \psi \approx h_1 \left[\sqrt{\theta_h^2 + 4h_1/(3a)} + \theta_h\right] \quad (9)$$

où θ_h peut être positif ou négatif. Pour $\theta_h = 0$, on a $d_1 \approx 2h_1/(3\psi)$.

Soit un trajet de propagation dont les deux points terminaux ont comme horizon une élévation de terrain isolée unique; on peut souvent considérer qu'un tel trajet comprend entre ses points terminaux une diffraction unique sur lame de couteau (voir Fig. 3) et il est alors possible de déterminer l'affaiblissement de diffraction, A (v) par rapport à l'espace libre, soit pour des trajets à visibilité directe ($v < 0$), soit pour des trajets transhorizon ($v > 0$).

Il existe une formule approchée pour la détermination de l'affaiblissement de diffraction A, par rapport à l'espace libre au-dessus d'une terre régulière, dans le cas de la polarisation horizontale:

$$A = G(\chi_0) - F(\chi_1) - F(\chi_2) - 20{,}67 \text{ (dB)} \quad (10)$$

Les fonctions $G(\chi_0)$ et $F(\chi_{1,2})$ ainsi qu'une fonction auxiliaire $\Delta(\chi_{1,2})$ sont tracées dans la Fig. 4:

$$\chi_0 = dB_0;\ \chi_1 = d_{Lt}\, B_0;\ \chi_2 = d_{Lr}\, B_0;\ B_0 = 670\,(f/a^2)^{1/3} \quad (11)$$

où $d_{Lt} \approx \sqrt{2ah_{te}}$ et $d_{Lr} \approx \sqrt{2ah_{re}}$ désignent les distances entre chaque antenne et son horizon radioélectrique sur une terre régulière. L'erreur sur A sera inférieure à 1 dB si l'on a:

$$\chi_0 - \chi_1 \Delta(\chi_1) - \chi_2 \Delta(\chi_2) > 320 \text{ km} \quad (12)$$

Cette condition implique que l'on peut négliger, dans la série des résidus, les termes d'ordre supérieur au second terme et que le second terme est beaucoup plus petit que le premier.

Immédiatement au-delà de l'horizon radioélectrique d'un émetteur, le mécanisme de propagation prédominant pendant plus de la moitié du temps est généralement la propagation par diffraction. Aux distances nettement supérieures à celle de l'horizon, le mode de propagation prédominant est le plus souvent la diffusion vers l'avant, surtout pendant les heures du jour et pendant les saisons où les conduits à niveau de transmission élevé et où les couches à grande altitude sont rares.

2.3 *Diffusion vers l'avant*

On a la formule approchée ci-après pour le calcul de la valeur médiane de l'affaiblissement de transmission à long terme dû à la diffusion vers l'avant:

$$L(50) = 30 \log f - 20 \log d + F(\theta d) - G_p - V(d_e) \text{ (dB)} \quad (13)$$

La Fig. 5 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 et d est la distance entre celles-ci [1].

On obtient une estimation semi-empirique de G_p par la formule:

$$G_p = G_t + G_r - 0{,}07 \exp [0{,}055 (G_t + G_r)] \text{ (dB)} \quad (14)$$

pour des valeurs de G_t et G_r inférieures chacune à 50 dB.

Dans la Fig. 6, $V(d_e)$ représente un ajustement pour les types de climats suivants:

1. Climat équatorial (données du Congo et de la Côte-d'Ivoire).
2. Climat intertropical continental (Soudan).
3. Climat intertropical maritime (données de la Côte occidentale d'Afrique).
4. Climat désertique (Sahara).
5. Climat méditerranéen (pas de courbes disponibles).
6. Climat continental tempéré (données fournies par la France, la République Fédérale d'Allemagne et les Etats-Unis d'Amérique).

7*a*. Climat maritime tempéré, zones terrestres (données du Royaume-Uni).

7*b*. Climat maritime tempéré, zones maritimes (données du Royaume-Uni).

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 à l'Annexe I une brève description des climats énumérés ci-dessus.

2.4 *Variation de l'affaiblissement de transmission*

La qualité du fonctionnement d'un service de radiocommunication et la possibilité pratique du partage des fréquences entre les services dépendent du rapport signal/bruit et signal/brouillage. 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 et une protection contre les brouillages dus aux signaux transmis dans la même voie ou dans des voies adjacentes lorsque les conditions de propagation sont favorables. On notera que les valeurs minimales admissibles de ces rapports dépendent d'une part, des caractéristiques des évanouissements subis par les signaux désirés et non désirés et par les bruits, d'autre part, des systèmes de démodulation et de codage utilisés. Si les caractéristiques des évanouissements restent invariables, les rapports en question sont constants dans le temps. Par ailleurs, les rapports disponibles dépendent de l'intensité

des signaux utiles et des bruits et sont invariables dans le temps. En conséquence, on fait une distinction entre les « évanouissements avec perturbation de phase » (évanouissements rapides) liés à des phénomènes de propagation par trajets multiples, 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 avec perturbation de phase, l'autre aux évanouissements de puissance à long terme. Dans le présent Rapport, on ne considérera que les valeurs médianes horaire des affaiblissements de transmission à long terme ainsi que les variations temporelles de ces valeurs au cours d'une année.

Pour pouvoir estimer $P\ (q)$, valeur de P dépassée pendant un pourcentage de temps q, ou $L\ (q)$, valeur de L dépassée pendant un pourcentage de temps de $(100—q)$, on définit 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 (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:

$$d_{sl} = 65\ (100/f)^{1/3}\ (\text{km}) \tag{15}$$

On compare la longueur du trajet d avec la somme de d_{sl} et des distances aux horizons radioélectriques sur une terre régulière:

$$d_L = 3\ \sqrt{2h_{te}} + 3\ \sqrt{2h_{re}}\ (\text{km}) \tag{16}$$

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 (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:

$$\text{pour } d \leqslant d_L + d_{sl}, \qquad d_e = 130\ d/(d_L + d_{sl})\ (\text{km}) \tag{17a}$$

$$\text{pour } d > d_L + d_{sl}, \qquad d_e = 130 + d — (d_L + d_{sl})\ (\text{km}) \tag{17b}$$

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 $L\ (50)$:

Ainsi:

$$P\ (q) = P\ (50) + Y\ (q)\ (\text{dBW}) \tag{18a}$$

ou bien:

$$L\ (q) = L\ (50) — Y\ (q)\ (\text{dB}) \tag{18b}$$

$$Y\ (q) = Y_0\ (q)\ g\ (f) \tag{19}$$

La Fig. 7 illustre des estimations empiriques du facteur $g\ (f)$ et les Fig. 8 à 14 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:

$$\sigma\ (q) = \sqrt{13 + 0{,}12\ Y^2\ (q)}\ (\text{dB}) \tag{20}$$

3. Résumé d'une seconde méthode [2]

La méthode qui est résumée ici a été mise au point à la suite de l'expérience professionnelle acquise lors de la construction de nombreux faisceaux hertziens opérant soit dans la zone de visibilité, soit au-delà de l'horizon.

On s'est efforcé de réduire au minimum les calculs et d'utiliser les résultats expérimentaux chaque fois que cela est possible.

Pour la commodité de l'exposé, on distingue 4 zones:

— espace libre,
— zone d'interférence,
— zone de diffraction (a: par une crête, b: par la courbe terrestre),
— zone dite de diffusion.

Pour les trois premières parties, on utilise une série de nomogrammes à points alignés [3] dont un exemple est donné Fig. 15.

Pour la quatrième partie on procède de la façon suivante:

3.1 *Méthode utilisée dans la zone dite de diffusion* [5]

Cette méthode consiste à déterminer séparément l'affaiblissement non dépassé pendant un pourcentage de temps élevé; par exemple 99 % du mois le plus mauvais, et l'affaiblissement non dépassé pendant un pourcentage de temps faible, par exemple 1 % de l'année entière. Le premier affaiblissement sert aux calculs des liaisons et le second aux problèmes de brouillage.

Après avoir déterminé la distance équivalente (ici définie comme le produit de la distance angulaire 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 des Fig. 16*a* et 16*b* 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.

Pour une fréquence quelconque comprise entre environ 200 et 4000 MHz, on ajoute à l'affaiblissement précédent la correction lue sur la Fig. 17. On obtient ainsi pour la fréquence et le climat choisis les affaiblissements non dépassés pendant 99 % du mois le plus mauvais et 1 % de l'année.

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. 18 et on admet une loi log-normale pour représenter la répartition mensuelle des variations lentes. Cette méthode peut aussi être utilisée pour les niveaux élevés correspondant à un pourcentage faible de l'année, mais la précision est moins grande.

3.2 *Calcul de l'affaiblissement dans la zone de diffusion à partir des paramètres radiométéorologiques*

3.2.1 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:

$$L_b = 110{,}5 + 30 \log d + 30 \log f - T \qquad (21)$$

L_b est l'affaiblissement entre antennes isotropes (affaiblissement de transmission de référence) en décibels

d est la distance en kilomètres

f est la fréquence en MHz

T est un paramètre égal à l'expression

$$T = -\frac{3}{8} G_e - \frac{5}{4} G_c \qquad (22)$$

G_e est le gradient équivalent entre le sol et le volume commun (qui peut être souvent remplacé par le gradient dans le premier kilomètre de l'atmosphère).

G_c 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.

Le pourcentage de temps auquel correspond la valeur de L_b dépend des heures des sondages météorologiques utilisés, comme il est expliqué à la référence [7].

Note. — Les définitions de N et du gradient équivalent sont données dans le Rapport 233-2.

3.2.2 L'Administration des Etats-Unis d'Amérique a comparé la formule (21) avec toutes les données qui ont servi de base à l'élaboration de la méthode décrite au § 2.3, 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 (21) par l'expression

$$20 \log (fd) + 10 \log (f D_s)$$

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. 19*a* et 19*b*.

3.2.3 Si l'on ne dispose pas de données pour déterminer G_e et G_c, on peut utiliser les diverses cartes reproduites dans l'ouvrage cité en [8], 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 [8] 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 [8] 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:

$$G_c \begin{cases} \frac{1}{3} [200 - N_s - \frac{2}{3} G_0] \text{ lorsque } 1 \text{ km} < D_s \theta < 2{,}7 \text{ km} \\ \frac{3}{7} [200 - N_s - \frac{2}{3} G_0] \text{ lorsque } D_s \theta \geqq 2{,}7 \text{ km} \end{cases} \qquad (23)$$

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.

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 233-2 ou en [8].

4. Autres méthodes

Une autre méthode de calcul de la répartition statistique du niveau des signaux sur des trajets à visibilité directe a été décrite [3]. Cette méthode tient compte des variations du signal causées par celles du gradient vertical de l'indice de réfraction et par des réflexions sur les couches troposphériques. L'influence du profil du terrain est également étudiée. Les calculs correspondant aux trajets transhorizon sont fondés empiriquement sur des années expérimentales [4]. Une autre méthode pour les trajets transhorizon s'est révélée utile au Royaume-Uni [6].

5. Conclusions

Pour pouvoir utiliser avec profit des méthodes de prévision simples, telles que celles décrites dans le présent Rapport, il faut pouvoir définir les limites de ces méthodes ainsi que les avantages de méthodes plus perfectionnées. Le Groupe de travail intérimaire aura pour tâche d'établir un rapport complet qui indiquera:

— comment tenir compte des incompatibilités de polarisation des antennes d'émission et de réception dans la propagation en espace libre;

— comment estimer les variations temporelles, spatiales et locales de l'absorption des hyperfréquences par l'oxygène, la vapeur d'eau, les pluies et les nuages, dans des conditions variées, par la gamme de fréquences 0,1-100 GHz;

— comment calculer un coefficient de réflexion au sol équivalent, dépendant de la conductivité, de la constante diélectrique, des irrégularités de terrain et de la courbure de la surface réfléchissante et dépendant également du rapport des produits des gains en tension des antennes dans les directions de propagation du rayon direct et du rayon réfléchi;

— comment calculer les zones de Fresnel et comment déterminer leur utilisation;

— comment tenir compte des effets de réflexion au sol et des variations de phase dans le cas d'une diffraction sur une lame de couteau unique;

— comment passer de façon continue des petits taux d'affaiblissement caractéristique de ce type de diffraction au cas diamétralement opposé des taux d'affaiblissement élevés que l'on rencontre, immédiatement au-delà de l'horizon, dans l'hypothèse d'une terre régulière;

— enfin, comment estimer le gain d'aérien pour un trajet donné et tenir compte de la dissymétrie des trajets, de la loi gain/fréquence et des réfractions inhabituelles lorsqu'on fait une estimation de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion vers l'avant.

De plus, il conviendra de rechercher les procédés nécessaires pour estimer la fiabilité des méthodes de prévision détaillées applicables à la transmission entre points fixes et pour calculer la probabilité de fonctionnement dans le cas des services dont le niveau de transmission est limité par les bruits.

Bibliographie

1. National Bureau of Standards, Technical Note 101, Révision (1er mai 1966).
2. Note technique No PR 3104 du Centre national d'études des télécommunications (1962).
3. Kalinine, A.I. *Calcul des faisceaux hertziens*, Sviaz (1964).
4. Kalinine, A.I. *Propagation transhorizon dans la bande des ondes métriques*. Sovietskoïé Radio, (1965).
5. Boithias, L. et Battesti, J. Les faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité. *Annales des télécommunications* (juillet-août 1965).
6. C.C.I.R. Doc. V/87 (Royaume-Uni), 1963-1966.
7. Battesti, J., Boithias, L. et Misme, P. Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques. *Annales des télécommunications* (mai-juin 1968).
8. Bean, B.R., Thayer, G.D. et Cahoon, B.A. A world atlas of the atmospheric radio refractive index, ESSA Monographie 1 (1961). Pour se le procurer, on peut s'adresser au Superintendent of Documents, Washington D.C., Etats-Unis.

ANNEXE

Les climats considérés dans ce Rapport 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 variation 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.

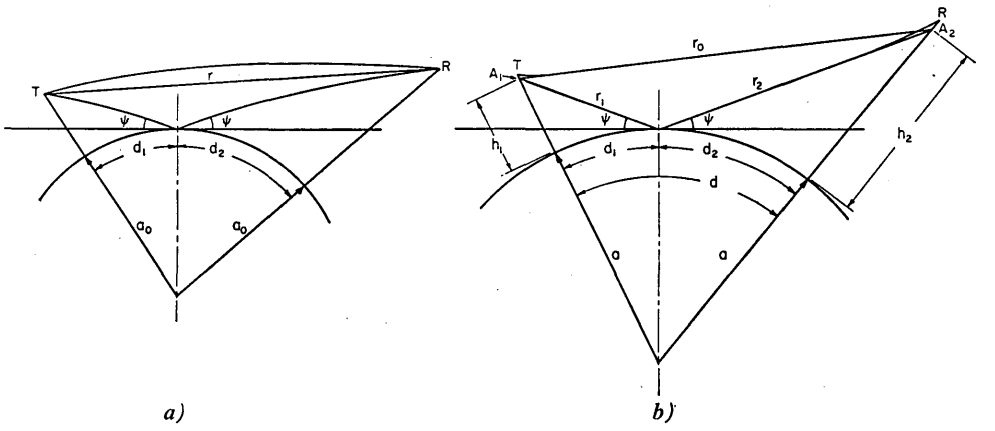


FIGURE 1

Relations géométriques pour les trajets de propagation en deçà de l'horizon

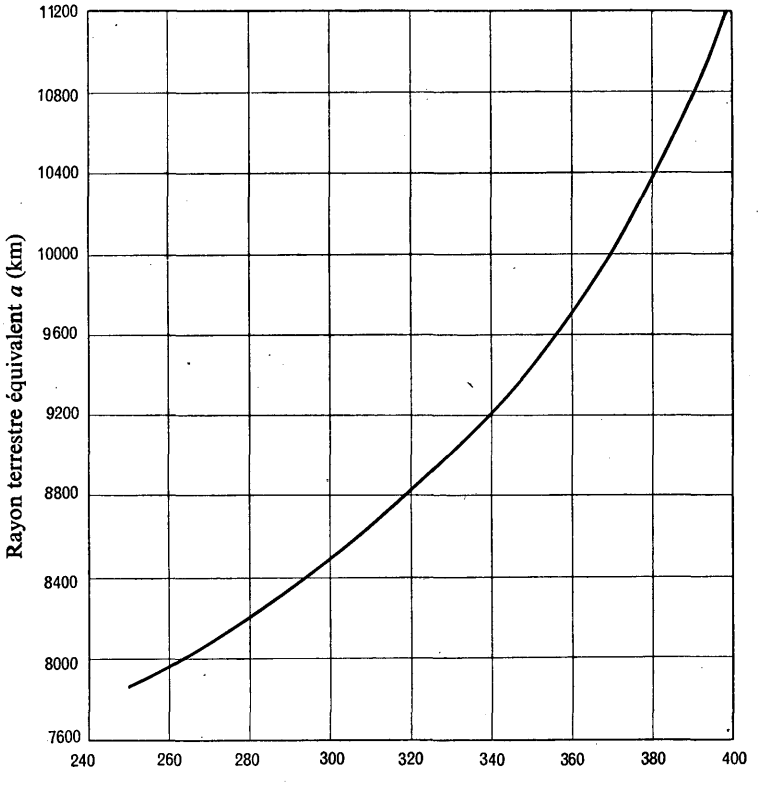


FIGURE 2

Variation du rayon terrestre équivalent, a, en fonction de N_s

$$v = \sqrt{(2d/\lambda).\ \mathrm{tg}\ \alpha_0\ \mathrm{tg}\ \beta_0}$$

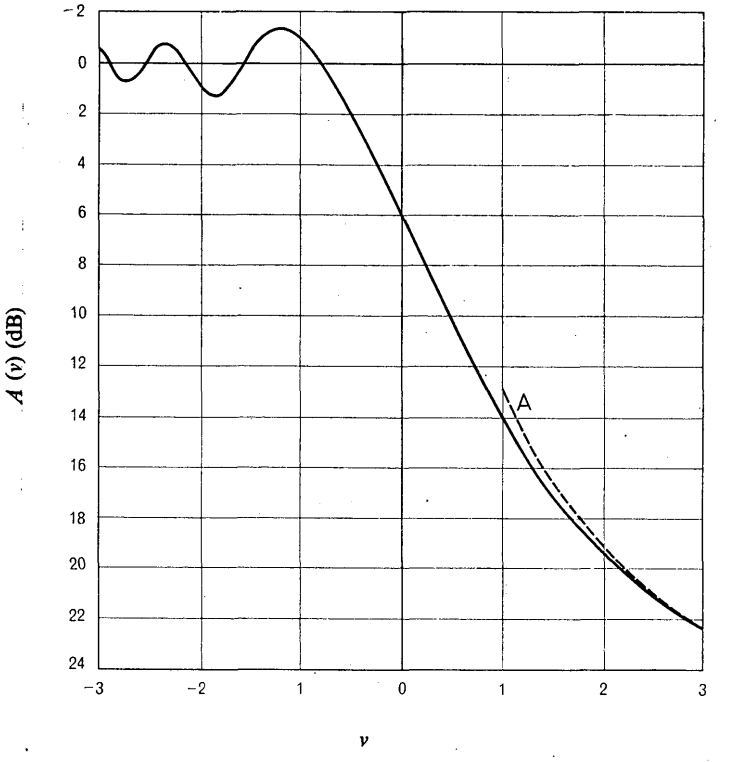


FIGURE 3

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

Courbe A: Asymptote: $A\ (v) = 12{,}953 + 20 \log_{10} v$

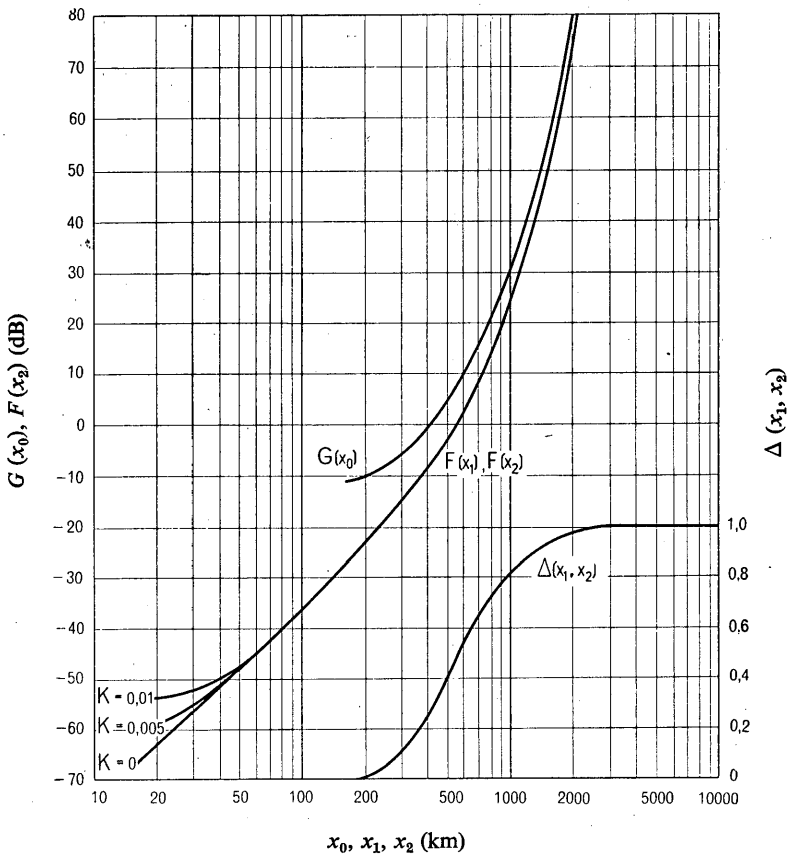


FIGURE 4

Note. — Pour les grandes valeurs de x :

$F(x) \approx G(x) - 1{,}356$

$G(x) \approx 0{,}0575104\ x - 10 \log x + 2{,}066$

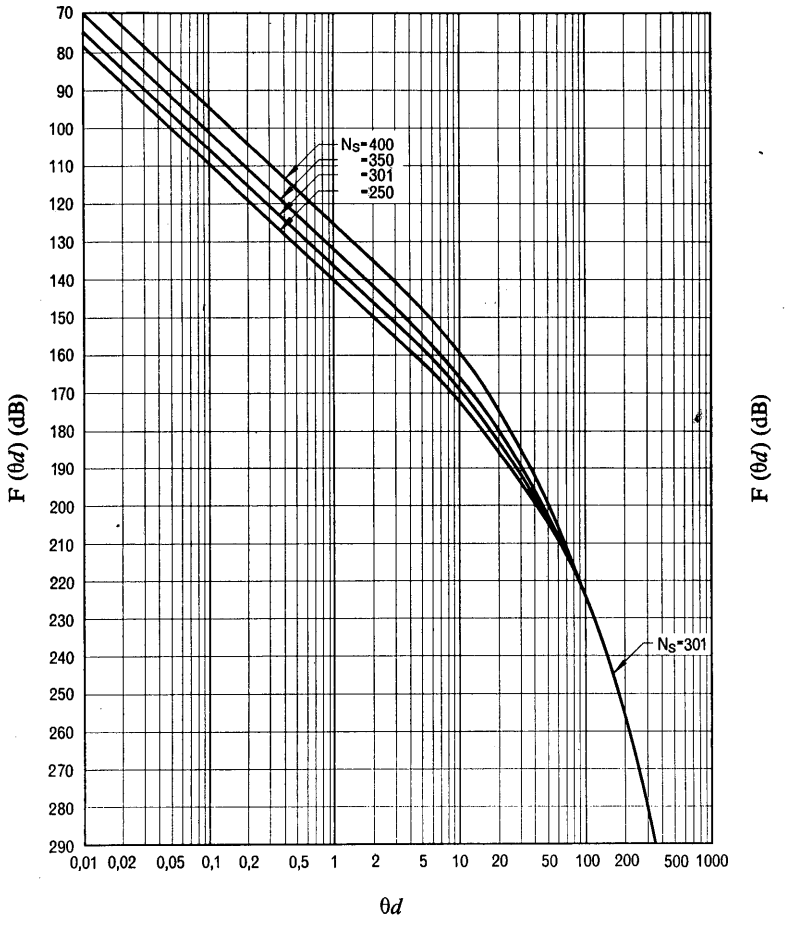


FIGURE 5

Fonction d'affaiblissement F (θd); d en km et θ en radian

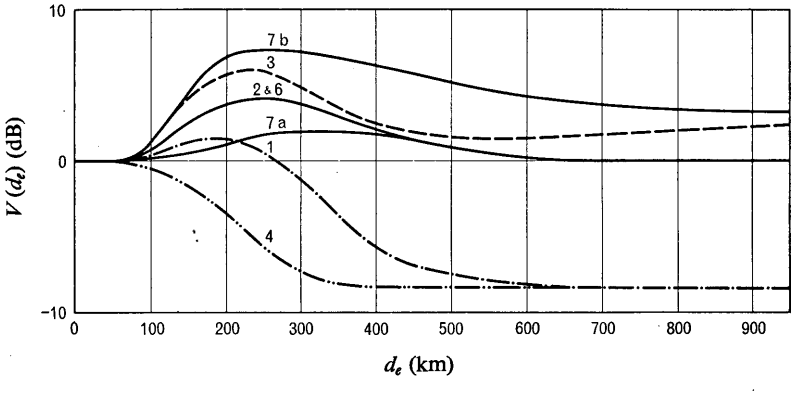


FIGURE 6

Fonction $V(d_e)$ pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir § 2.3)

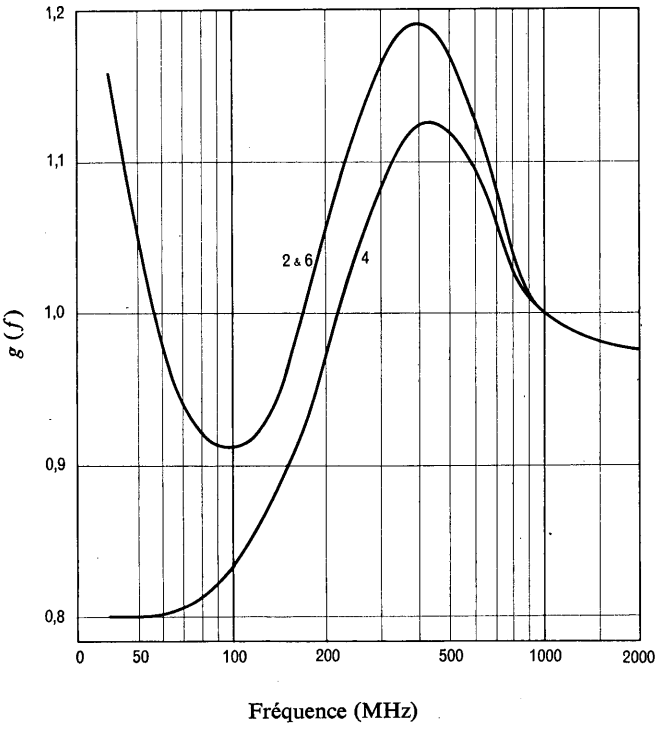


FIGURE 7

Fonction g(f) pour les types de climat désignés par les chiffres sur les courbes (voir § 2.3)

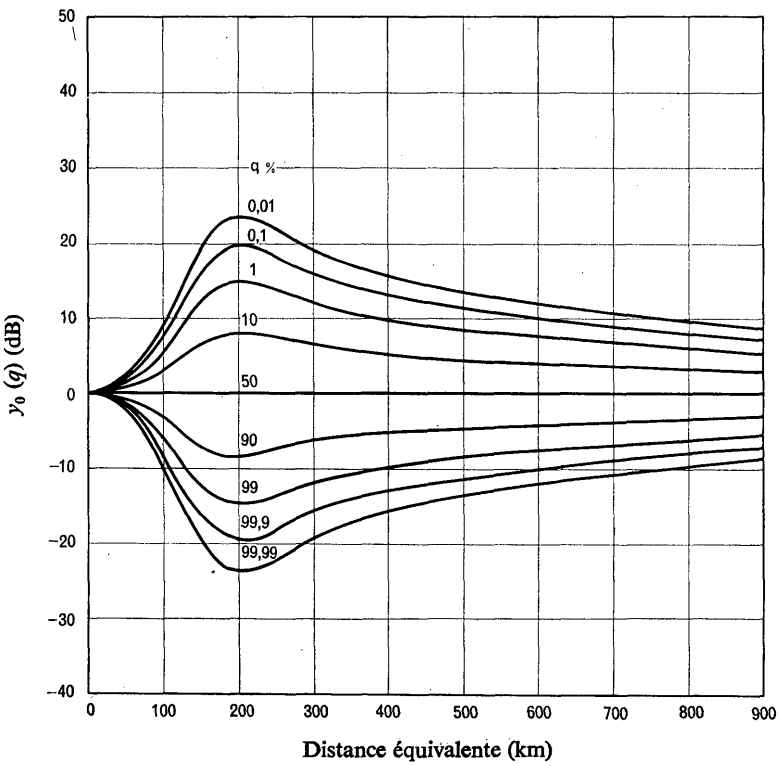


FIGURE 8

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 1 (équatorial)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

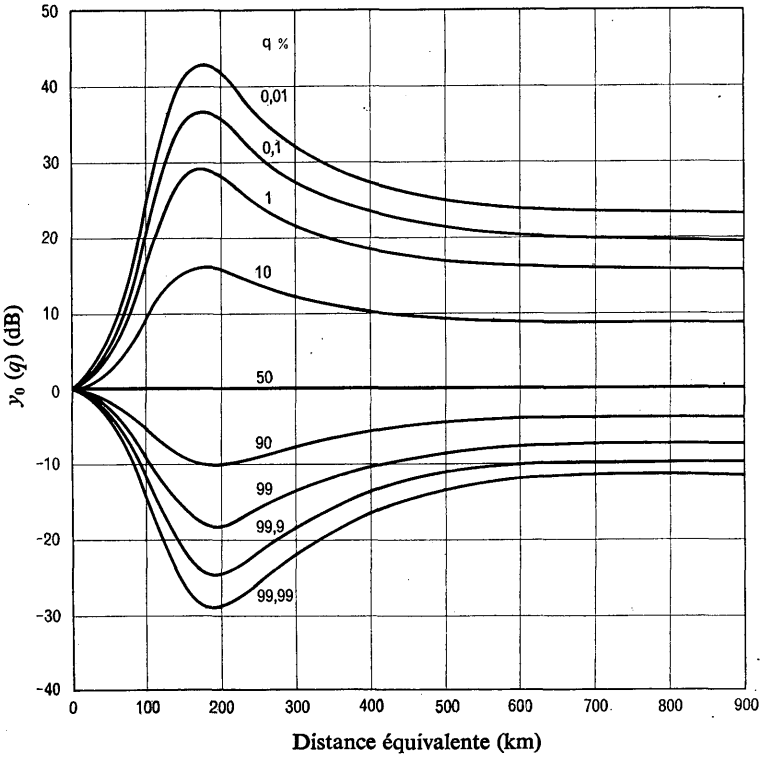


FIGURE 9

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 2 (intertropical continental, Soudan)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

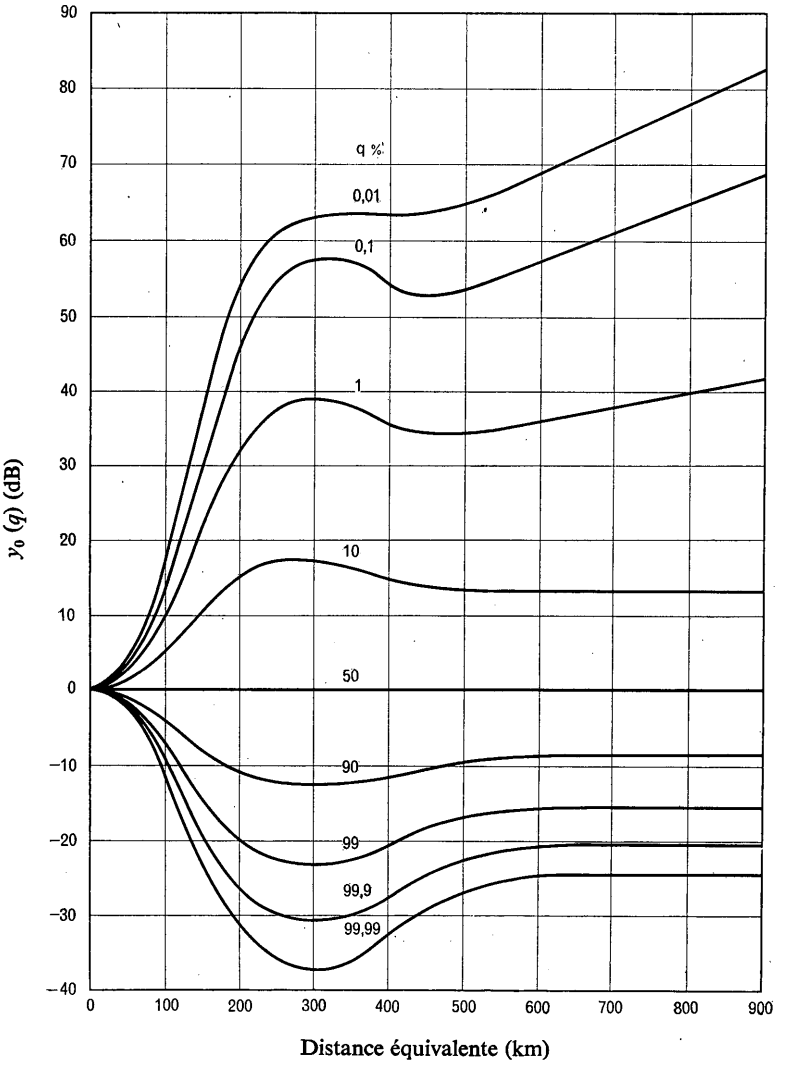


FIGURE 10

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 3 (intertropical maritime)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

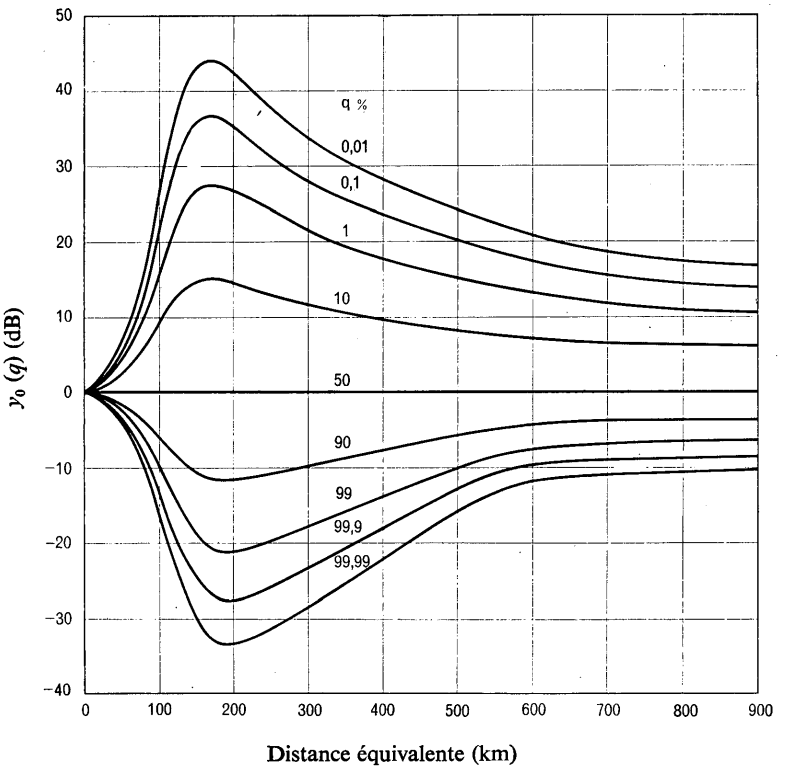


FIGURE 11

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 4 (désertique, Sahara)

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

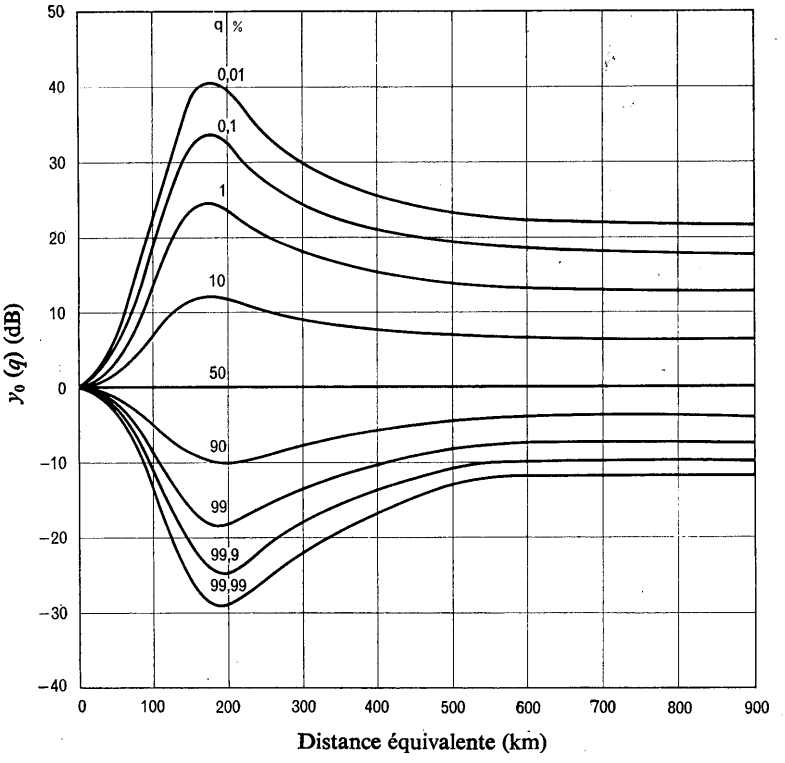


FIGURE 12

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 6 (continental tempéré)
(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

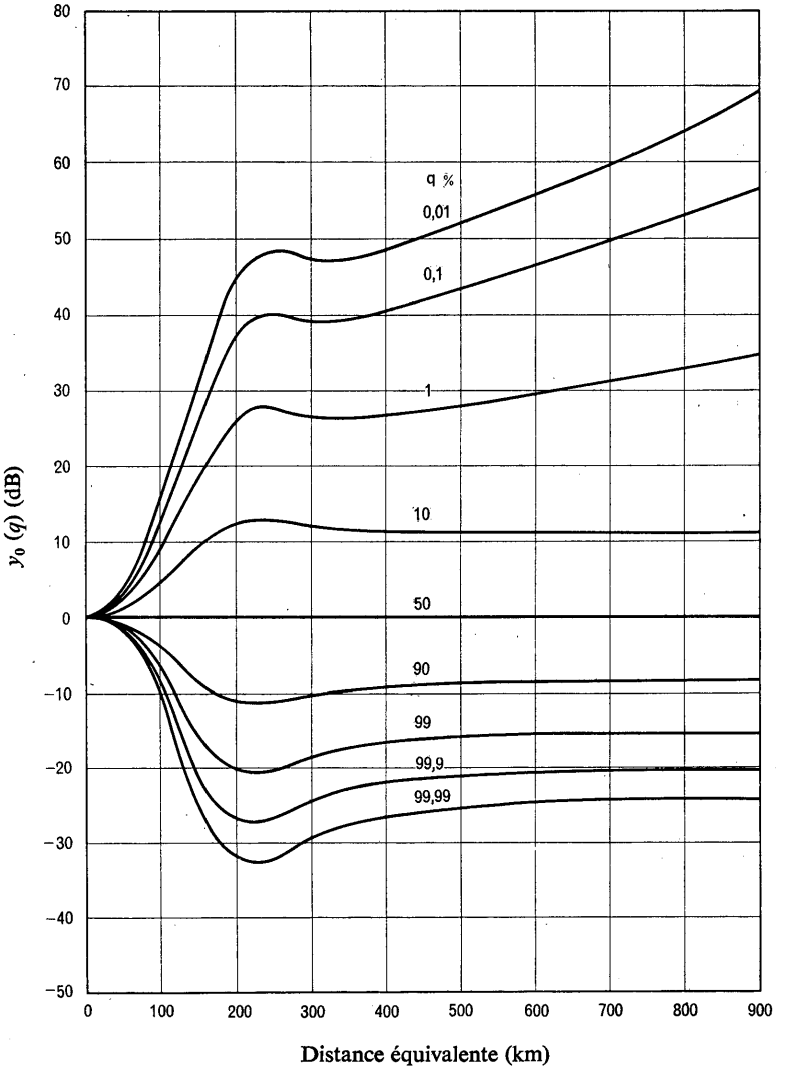


FIGURE 13

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 7a (maritime tempéré). Trajets terrestres
(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

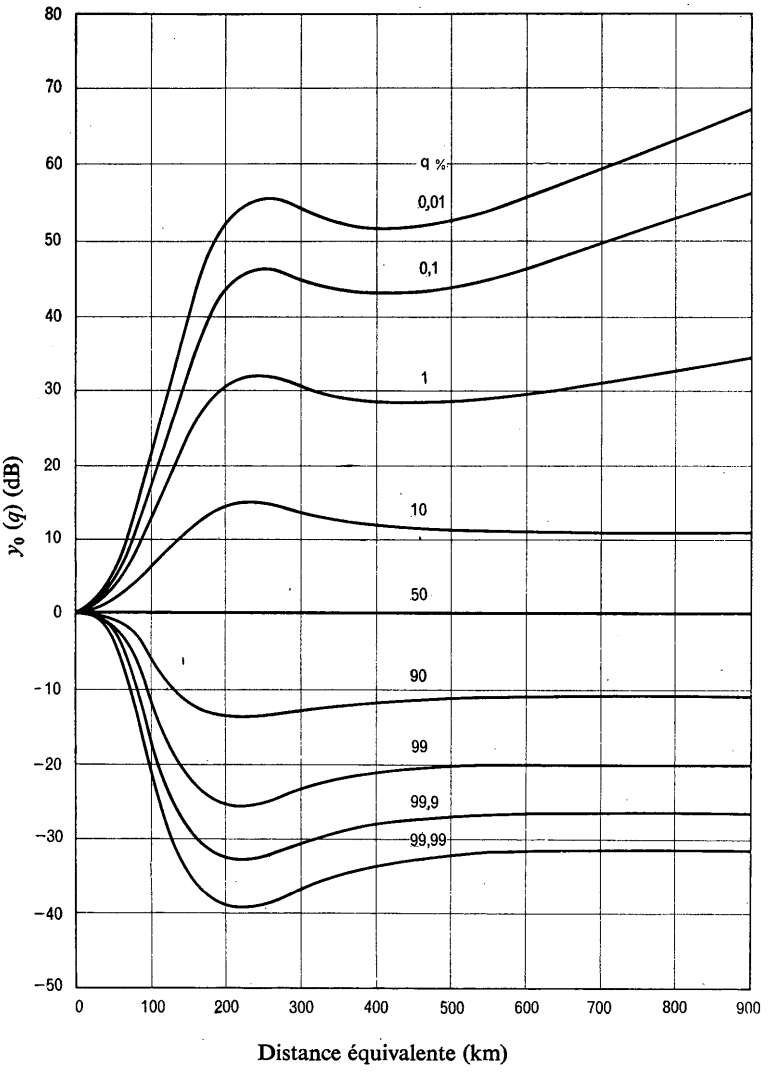


FIGURE 14

Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat 7b (maritime tempéré). Trajets maritimes

(Les valeurs de q sont indiquées sur les courbes)

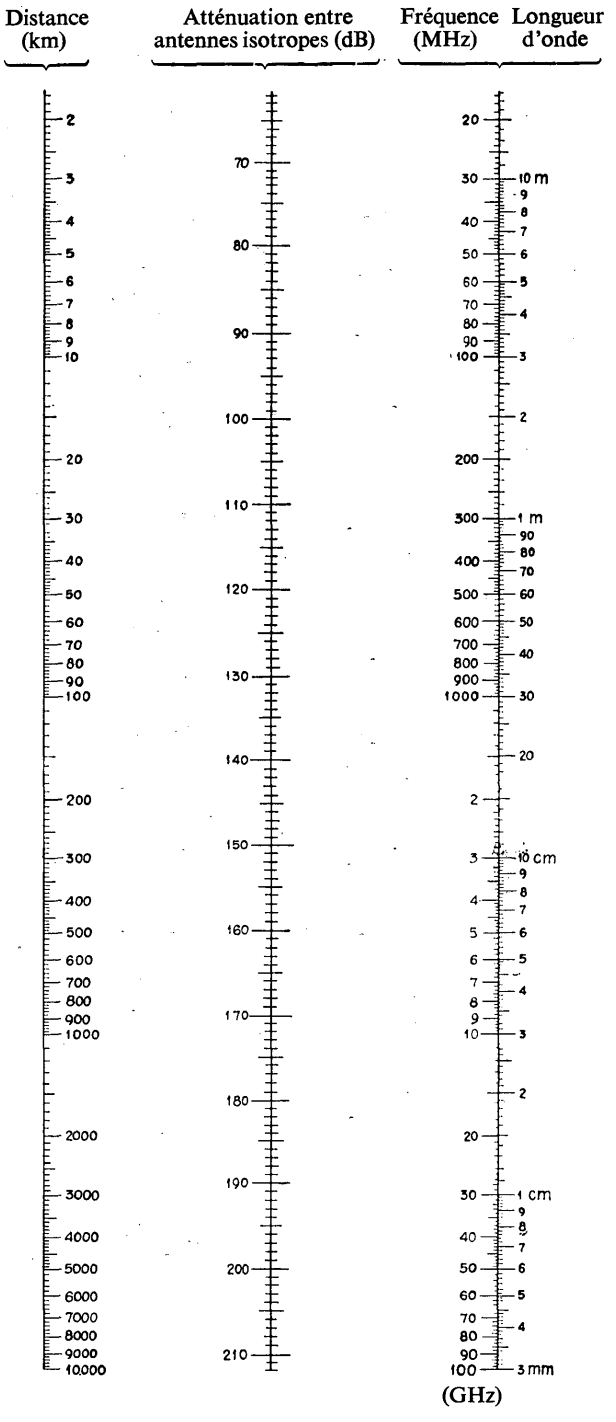


FIGURE 15

Affaiblissement de transmission en espace libre entre antennes isotropes

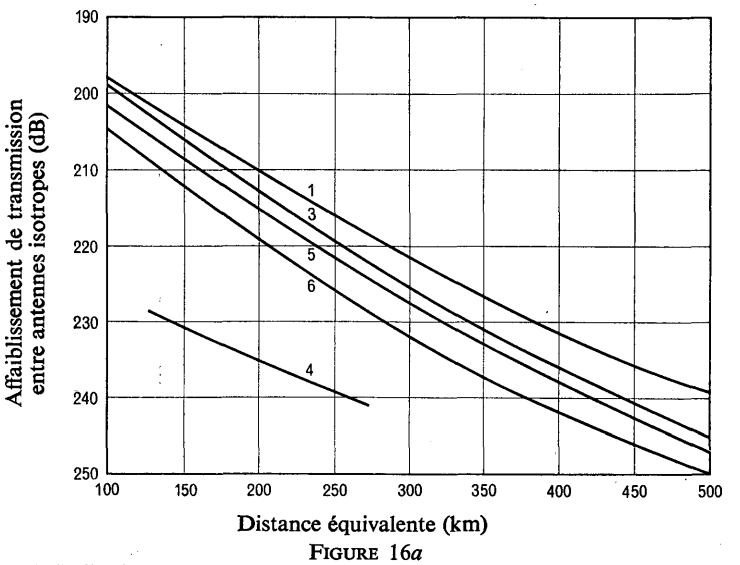


FIGURE 16*a*

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 § 2.3)

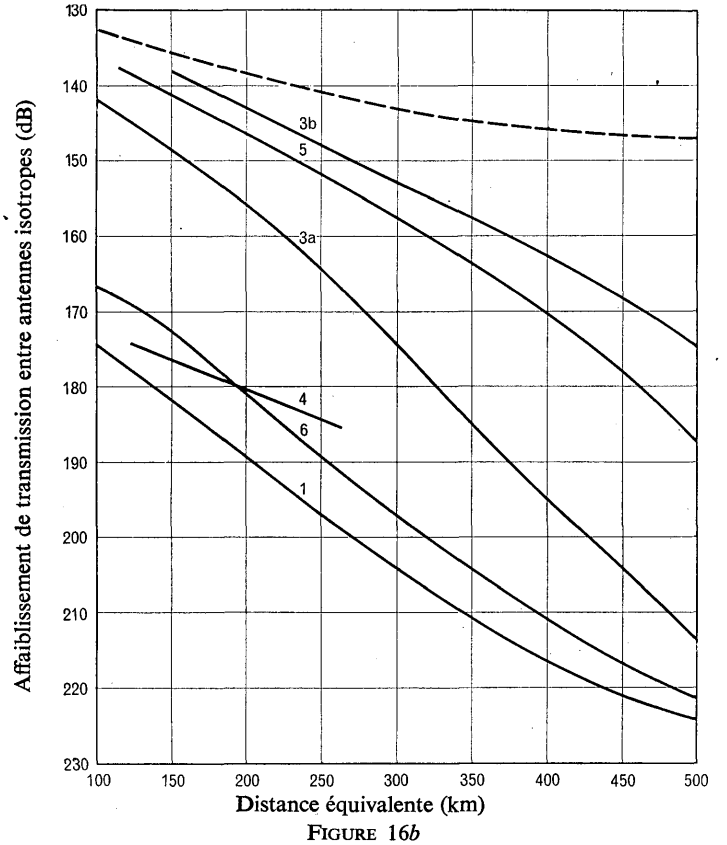


FIGURE 16*b*

Valeur de l'affaiblissement de transmission qui n'est pas dépassée pendant 1% de l'année entière pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 2.3)

Courbes 1, 4 et 6: trajets terrestres

Courbes 3a, 3b et 5: trajets maritimes

— — — — — Espace libre

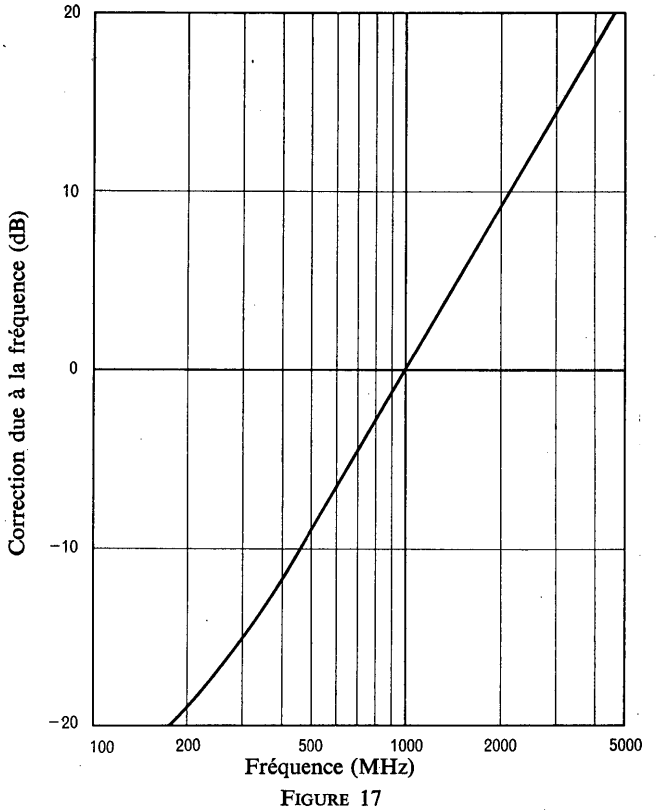


FIGURE 17

Corrections à appliquer aux valeurs obtenues à partir des courbes de la Fig. 16 pour des fréquences autres que 1 GHz

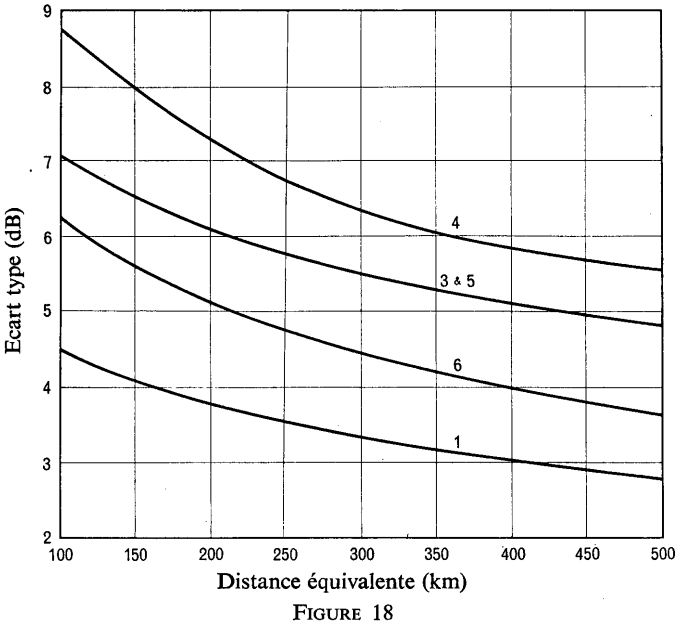


FIGURE 18

Ecart type pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 2.3)

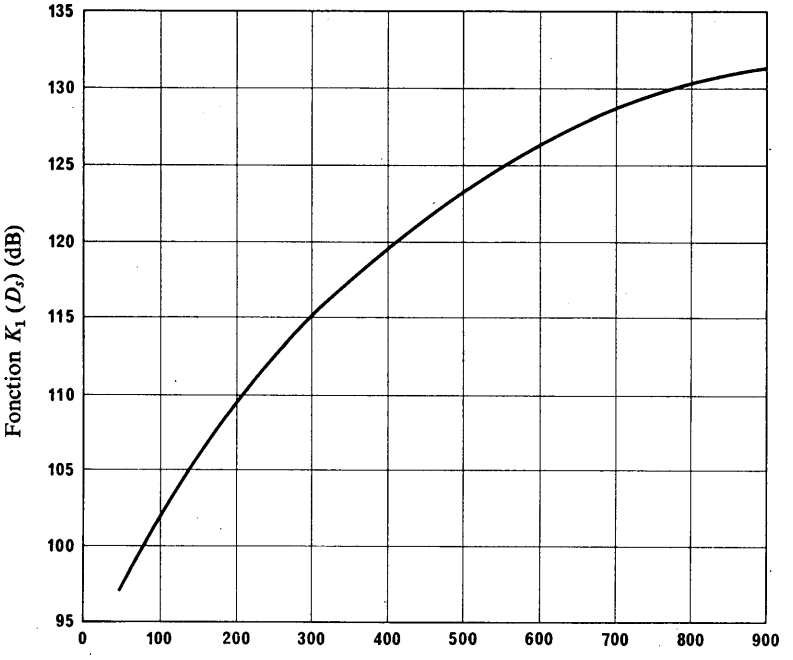
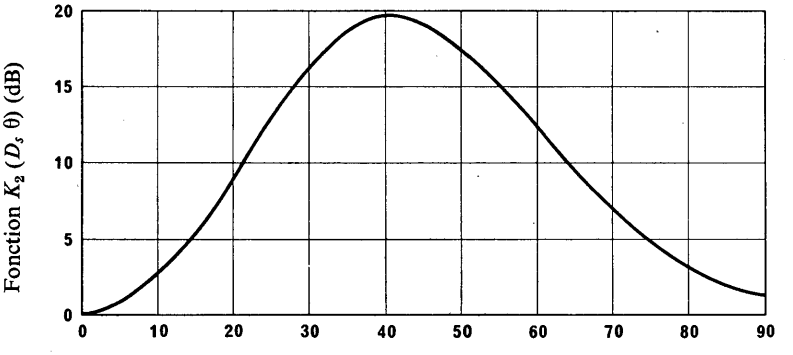


FIGURE 19*a*



Paramètre D_s θ, avec D_s exprimé en km et θ en radians

FIGURE 19*b*

RAPPORT 336 *

UTILISATION DES FRÉQUENCES DANS LA RÉGION SITUÉE AU-DESSUS DE L'IONOSPHÈRE ET SUR LA FACE CACHÉE DE LA LUNE

(1966)

Le § 2 de la Question 8/2 soumis à la Commission d'études 5 pose le problème de l'importance de l'effet d'écran de la Lune en fonction de la fréquence, de la distance angulaire à partir du bord de la Lune vers le centre de sa face cachée et de la distance à la surface de la Lune.

Dans les documents de la Commission d'études 5 il est fait état de la diffraction autour d'obstacles de grandes dimensions, mais seulement dans le cas de la propagation au-dessus de la Terre. Le problème principal contenu dans le § 2 de la Question posée par la Commission d'études 2 est vraisemblablement de déterminer le facteur d'écran dû à la diffraction autour de la Lune, considérée comme un grand objet sphérique.

Le rayon de la Lune étant immense par rapport à la plus grande longueur d'onde que l'on pourrait envisager dans cette question, 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: $2\pi a/\lambda >> 1$, 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 [1], 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 236-2, 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.

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 [2] (voir également le Rapport 244-2).

BIBLIOGRAPHIE

1. MILLINGTON, G. A note on diffraction round a sphere or cylinder. *Marconi Review*, Vol. 23, **139**, 170 (1960).
2. VOGLER, L.E. A study of lunar-surface radiocommunications. NBS Monograph No. 85 (1965).

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

RAPPORT 337-1 *

FACTEURS DE PROPAGATION DONT DÉPEND LE PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES ENTRE SYSTÈMES SPATIAUX ET FAISCEAUX HERTZIENS DE TERRE

(1970)

Dans la question du partage des bandes de fréquences entre systèmes spatiaux et systèmes de Terre, on peut être amené à tenir compte des facteurs de propagation ci-après:

— effets du terrain,
— effets de la végétation et des bâtiments,
— effets des hétérogénéités de la troposphère,
— effets des conduits troposphériques,
— diffusion par les hydrométéores,
— diffusion par les aéronefs,
— réfraction troposphérique.

Le Rapport 244-2 contient des renseignements qui peuvent être utilisés pour évaluer les effets du terrain et les caractéristiques de la troposphère, mais il ne traite pas des effets de la végétation et des bâtiments ni de la diffusion par les précipitations ou les aéronefs.

Le Rapport 339-1 porte sur les facteurs fondamentaux qui interviennent dans le calcul du champ dû à la diffusion par les hydrométéores; on peut le regarder comme une réponse partielle à la Question 14-1/4.

Le Rapport 427 donne une méthode qui permet d'obtenir les facteurs d'écran du terrain, il constitue une autre réponse à la Question 14-1/4.

RAPPORT 338-1 **

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE

(Programme d'études 5-1A-1/5)

(1966 – 1970)

1. Introduction

En plus du grand nombre de données qui ont été rassemblées pour faire suite à la Circulaire administrative AC/63 (voir le Rapport 241-1) et des renseignements pertinents contenus dans le Rapport 244-2, 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.

---

* Ce Rapport, conjointement avec le Rapport 427, remplace le Rapport 337 et a été adopté à l'unanimité.

** Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

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 de courbes typiques. On trouve cependant certains renseignements dans [8, 32, 50]. C'est pourquoi ce présent Rapport traite donc principalement des fréquences supérieures à 1 GHz.

2. 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.

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) [48].

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 [2].

Il résulte de mesures effectuées au Japon [3] et au Royaume-Uni [4] 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 [3]; l'expérience a confirmé les résultats de cette méthode.

Des mesures effectuées en U.R.S.S. [5] 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.

2.1 *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 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 [6], 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 et au Royaume-Uni.

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 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 [7].

Des mesures de l'angle d'arrivée effectuées en République Fédérale d'Allemagne [8], 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 [9] indiquent que la valeur effective de k dépasse 0,9 pendant 99,9% du temps.

Des mesures faites en Italie [10] 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 [11] 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.

2.2 *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 [9] 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 $\pm$ 7 minutes d'arc.

Des mesures faites en République Fédérale d'Allemagne [8], 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 [12, 13] 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° 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°.

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 [7].

2.3 *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 [12] ont montré qu'il peut exister jusqu'à six composantes à la fois.

Les mesures de propagation par trajets multiples effectuées au Japon [31] 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 [14]. 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 [15] 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 réfléchie au sol soit diffusée hors du trajet de propagation [16]. Cependant, dans des conditions de superréfraction atmosphérique et lorsque la terre paraît concave, l'onde réfléchie est renforcée du fait de la convergence des rayons associés.

Des essais faits en République Fédérale d'Allemagne [19] 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 [18] 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 [19].

3. Statistiques des évanouissements

L'étude faite au Royaume-Uni des 27 sections de faisceaux hertziens [6] — 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 [27], 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 différaient considérablement. A titre d'indication générale, les réalisateurs de faisceaux hertziens en Europe trouveront à la Fig. 2 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.

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. 2, 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. 2, 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. 2 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. 2. 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 [46].

Des mesures faites aux environs de Dresde sur un trajet de 56 km [37], 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 [20] 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 les difficultés que l'on pourrait rencontrer, pour estimer la profondeur des évanouissements pour de si petits pourcentages de temps, on a mis au point au Japon une méthode fondée sur la probabilité d'apparition d'évanouissements de type Rayleigh [35]. Dans ce pays, l'étude d'un grand nombre de circuits a montré que la probabilité P_R d'évanouissements de type Rayleigh est donnée par la formule empirique ci-après pour des trajets libres à visibilité directe, avec une réflexion négligeable sur la surface terrestre:

$$P_R = K.Q\,(f/4)^{1,2} \times d^{3,5}$$

$K = 5{,}1 \times 10^{-9}$

Q = 0,4 (au-dessus des montagnes)

= 1,0 (au-dessus des plaines)

= $72/(\bar{h})^{1/2}$; $\bar{h} = (h_1 + h_2)/2$ (au-dessus de la mer ou du littoral)

f = fréquence (GHz)

d = longueur du trajet (km)

La probabilité d'apparition d'un bruit de circuit impulsif de niveau supérieur à N, dû à des évanouissements profonds, peut être calculée à l'aide de l'expression:

$$P_R\,(N_0/N)$$

dans laquelle N_0 représente le bruit thermique pour la propagation en espace libre [36].

4. 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 [23, 24, 25].

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 pous protéger la réception en diversité contre les évanouissements profonds. Certaines méthodes [25, 1], 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 [26].

Des études faites en République Fédérale d'Allemagne ont montré que la diversité d'espace avec des antennes séparées verticalement de 50 longueurs d'onde permet de réduire les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, mais des études effectuées en France [7] et en Italie [10] montrent qu'un espacement de 150 longueurs d'onde est souhaitable. Les mesures faites à travers la Manche sur 4 GHz montrent que ces espacements sont insuffisants lorsqu'il se produit une défocalisation du signal et que l'on peut être obligé d'utiliser un décalage vertical de 700 à 1400 longueurs d'onde. En Italie, où l'on a effectué des études sur quatre trajets différents, on a constaté que pour des trajets de longueur supérieure à 100 km, l'amélioration procurée par la diversité d'espace est pratiquement celle que l'on peut espérer avec des signaux sans corrélation entre eux.

En Italie [10], 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 [17, 14], 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 [27, 28, 29], on a tracé les courbes de la Fig. 3 [11] 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 [33, 34] 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.

5. Bruit d'intermodulation dû à la propagation par trajets multiples

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 [30] sur un trajet de 55 km et à 11 GHz [20] 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 [31] 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 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 2 π, a été mise au point en Suède [47].

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 [49].

6. Renseignements supplémentaires concernant les fréquences supérieures à 10 GHz *

La propagation radioélectrique aux hyperfréquences à travers l'atmosphère est affaiblie par la pluie, la grêle, la neige et la vapeur d'eau saturée. Si les effets de la pluie sont peu importants dans la région la plus basse des hyperfréquences, ils deviennent plus importants dans la caractéristique d'affaiblissement à des fréquences supérieures à 10 GHz. C'est ainsi qu'au Japon [38], à 15,4 GHz, on a observé qu'une pluie uniforme tombant à raison de 100 mm/h produit un surcroît d'affaiblissement de 7 dB/km environ. Un affaiblissement de 49 dB, dû à une précipitation pluviale de 72 mm/h, a été aussi observé sur un trajet de 15 km de longueur. Aux Etats-Unis [39], on a observé qu'une pluie uniforme, tombant à raison de 100 mm/h, produisait à 18 GHz un surcroît d'affaiblissement supérieur à 22 dB/km. Dans ces conditions, il est évidemment impossible d'assurer une transmission sur des trajets d'une longueur dépassant un petit nombre de kilomètres. Cependant, des mesures récentes ont montré que les distributions temporelles et spatiales d'orages pluvieux d'une telle intensité sont très restreintes. Néanmoins, pour donner un haut degré de fiabilité à des faisceaux hertziens fonctionnant à ces fréquences, il faut les limiter à des bonds de courte longueur [40, 41]. Le surcroît d'affaiblissement est principalement causé par la pluie, mais on doit tenir compte aussi de l'affaiblissement dû à la vapeur d'eau et au brouillard.

Des mesures effectuées à 11 GHz, sur six trajets, au Royaume-Uni [20, 9], montrent que si l'affaiblissement dû aux précipitations est plus important qu'à 4 ou à 6 GHz, il ne constitue cependant pas, ni sur une base mensuelle ni sur une base annuelle, un facteur prépondérant. Il peut ne pas en être de même pour des pays aux climats différents. Des études faites au Japon [21] indiquent que, dans les régions pluvieuses, l'affaiblissement causé par la pluie est le facteur prépondérant aux fréquences supérieures à environ 10 GHz. Au Japon et dans d'autres pays, on a établi des méthodes permettant de calculer l'affaiblissement dû à la pluie à partir de données fournies par des stations météorologiques. Ces méthodes indiquent qu'il convient de tenir compte d'une distribution spatiale non uniforme des précipitations. Des mesures faites à 15 GHz, au Canada, sur un trajet de 16 km [22], montrent que des précipitations intenses causent un affaiblissement supplémentaire considérable. Elles soulignent, de plus, la possibilité d'affaiblissements provoqués par la neige mouillée [20].

Le Tableau I représente les résultats de mesures comparatives effectuées dans la partie sud de l'Angleterre [45] au sujet de l'affaiblissement aux fréquences 11, 18 et 36 GHz, sur un trajet de 24 km de longueur.

Des calculs basés sur des travaux effectués aux Etats-Unis [44] montrent qu'au Royaume-Uni [42, 43], 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 μW 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.

---

* Voir également le Rapport 234-2 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.

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: $\pm$1 dB à 2 km; $\pm$5 dB à 10 km,
à 35 GHz: $\pm$3 dB à 10 km; $\pm$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.

7. 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 § 2.1.

TABLEAU I

Profondeur d'évanouissement (dB) dépassée pendant le pourcentage de temps indiqué

GHz	Année entière				Mois le plus défavorable			
	0,001	0,01	0,1	1,0	0,001	0,01	0,1	1,0
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

BIBLIOGRAPHIE

1. NORTON, K.A., HUFFORD, G.A., DOUGHERTY, H.T. et WILKERSON, R.E. Diversity design for within-the-horizon radio-relay systems. NBS, Report 8787 (1965).
2. C.C.I.R. Doc. V/8 (France), 1963-1966.
3. C.C.I.R. Doc. V/20 (Japon), 1966-1969.
4. C.C.I.R. Doc. V/12 (Royaume-Uni), 1966-1969.
5. KALININ, A.I. Calculs de liaisons par faisceaux hertziens (en russe). *Sviaz*, Moscou, 128-135 (1964).
6. C.C.I.R. Doc. V/11 (Royaume-Uni), 1963-1966.
7. IKEGAMI, F., AKIYAMA, T., AOYAGI, S. et YOSHIDA, H. Variation of radio refraction in the lower atmosphere. *IEEE Trans.*, Vol. AP-16, **3** (mars 1968).
8. C.C.I.R. Doc. V/3 (République Fédérale d'Allemagne), 1966-1969.
9. BELL, J. Propagation measurements at 3, 6 and 11 GHz over a line-of-sight radio path. *Proc. I.E.E.*, 114, **5**, 545 (1967).
10. C.C.I.R. Doc. V/53 (Italie), 1966-1969.
11. BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. Nouvelles expérimentations sur la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Annales des télécommunications* (novembre-décembre 1967).
12. CRAWFORD, A.B. et JAKES, W.C. Selective fading of microwaves. *B.S.T.J.*, 68-90 (1952).
13. SHARPLESS, W.M. Measurements of the angle of arrival of microwaves. *Proc. I.R.E.*, Vol. 34, 837-845 (novembre 1946).
14. C.C.I.R. Doc. V/106 (Italie), 1963-1966.
15. GIUGLIARELLI, G. Influence de la propagation maritime sur la transmission des signaux de télévision en couleur. *Revue de l'U.E.R.*, **90-A**, Technique (avril 1965).
16. RICE, P.L., LONGLEY, A.G., NORTON, K.A. et BARSIS, A.P. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits. NBS Technical Note 101 (1965).
17. C.C.I.R. Doc. V/23 (Japon), 1963-1966.
18. SMITH-ROSE, R.L. et STICKLAND, A.C. 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 (1946).
19. FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. Contribution à l'explication des phénomènes d'évanouissement sur des liaisons radioélectriques en visibilité directe dans les bandes des ondes décimétriques et centimétriques. Technischer Bericht Nr. 5578 du Fernmeldetechnisches Zentralamt de la Deutsche Bundespost (1er avril 1965).
20. TURNER, D. et autres. Experimental investigation into radio propagation at 11.0-11.5 GHz. *Proc. I.E.E.*, 113, **9**, 1477 (1966).
21. UGAI, S. et KANEDA, Y. Statistical evaluation of microwave attenuation due to rain cells. *Rev. of the E.C.L.*, Vol. 11, **5-6** (mai-juin 1963).
22. BLEVIS, B.C., DOHOO, R.M. et MCCORMICK, K.S. Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. *IEEE Trans.*, AP-15, 394-403 (1967).
23. ALBERTSON, J.N. Space diversity on the microwave system of the Southern Pacific. *Wire Radio Commun.*, 83-87 (novembre 1964).
24. CABESSA, R. Réalisation de liaisons par faisceaux hertziens de qualité sur des trajets maritimes en Grèce. *L'Onde Electrique*, **35**, 714-727 (1955).
25. LEWIN, L. Diversity reception and automatic phase correction. *Proc. I.E.E.*, **109B**, 295-304 (1962).
26. C.C.I.R. Doc. V/102 (Japon), 1963-1966.
27. BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. Etude des sections longues dans les faisceaux hertziens en visibilité. *Annales des télécommunications* (juillet-août 1964).
28. MAKINO, M. et MORITA, K. The space diversity reception and transmission systems for line-of-sight microwave links. *Rev. Electr. Communic. Lab. Jap.* (janvier-février 1965).
29. KAYLOR, R.L. A statistical study of selective fadings of S.W.F. radio signals. *B.S.T.J.* (septembre 1953).

30. MEADOWS, R.W. et autres. 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 (1966).

31. NOMURA et autres. Distortion due to fading in high-capacity FDM-FM transmission. *Electronic and Electrical Communications in Japan*, Vol. 50, **6** (1967).

32. KINASE, A. et autres. Oversea propagation statistics of the UHF band within-the-horizon and VHF band beyond-the-horizon. *NHK Tech. Jour.*, **19**, 7 (1967).

KINASE, A. et autres. Statistical characteristics of field strength variation on the UHF and VHF bands. *NHK Tech. Jour.*, **19**, 4 (1967).

33. MCGAVIN, R.E. et autres. Microwave diversity over irregular terrain. *ESSA Technical Memorandum* ERLTM-WPL 3 (décembre 1968).

34. SKERJANEC, R.E. et autres. Space and frequency diversity measurements on a line-of-sight path in Ohio. *ESSA Technical Memorandum* ERLTM-ITS 145 (octobre 1968).

35. MORITA, K. et KAKITA, K. Fading in microwave relays. *Rev. of E.C.L.* **6**, 9, 352-357 (1958).

36. MAKINO, H. et MORITA, K. Design of space diversity receiving and transmitting systems for line-of-sight microwave links. *IEEE Trans.*, CT-15, **4**, 603-614 (août 1967).

37. C.C.I.R. Doc. V/139 (O.I.R.T.), 1966-1969.

38. TAKADA, M. et autres. SF-F2 short-haul radio-relay system in the 15 GHz. *Review of the Electrical Communication Laboratory, N.T.T.*, **16**, 613-641 (juillet-août 1968).

39. HOGG, D.C. Millimetre Wave Communication through the Atmosphere. *Science*, **159**, 3810, 39-46.

40. HICKIN, E.M. 18 GHz Propagation. I.E.E. Conference on Tropospheric Wave Propagation, Londres (septembre-octobre 1968).

41. HARROLD, T.W. Attenuation of 8.6 mm-wavelength radiation in rain. *Proc. I.E.E.*, **114**, 201 (1967).

42. LANE, J.A. 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 (1968).

43. C.C.I.R. Doc. V/I (Royaume-Uni), 1966-1969.

44. WEIBEL, G.E. et DRESSEL, H.O. Propagation studies in millimetre-wave link systems. *Proc. IEEE*, **55**, 497 (1967).

45. C.C.I.R. Doc. IX/164 (Royaume-Uni), 1966-1969.

46. C.C.I.R. Doc. V/196 (U.R.S.S.), 1963-1966.

47. RUE, O. Investigation of intermodulation noise due to multipath reception in high capacity microwave links, Central Administration of Swedish Telecommunications Report 170 (1968).

48. DOUGHERTY, H.T. A survey of microwave fading mechanisms, remedies, and applications. *ESSA Tech. Rept.* ERL69-WPL 4 (1968).

49. C.C.I.R. Doc. IX/186 (France), 1966-1969.

50. KINASE, A. et ITO, S. UHF space diversity statistics on a long line-of-sight oversea path diversity efficiency. *NHK Tech. Jour.*, **21**, 2 (1969).

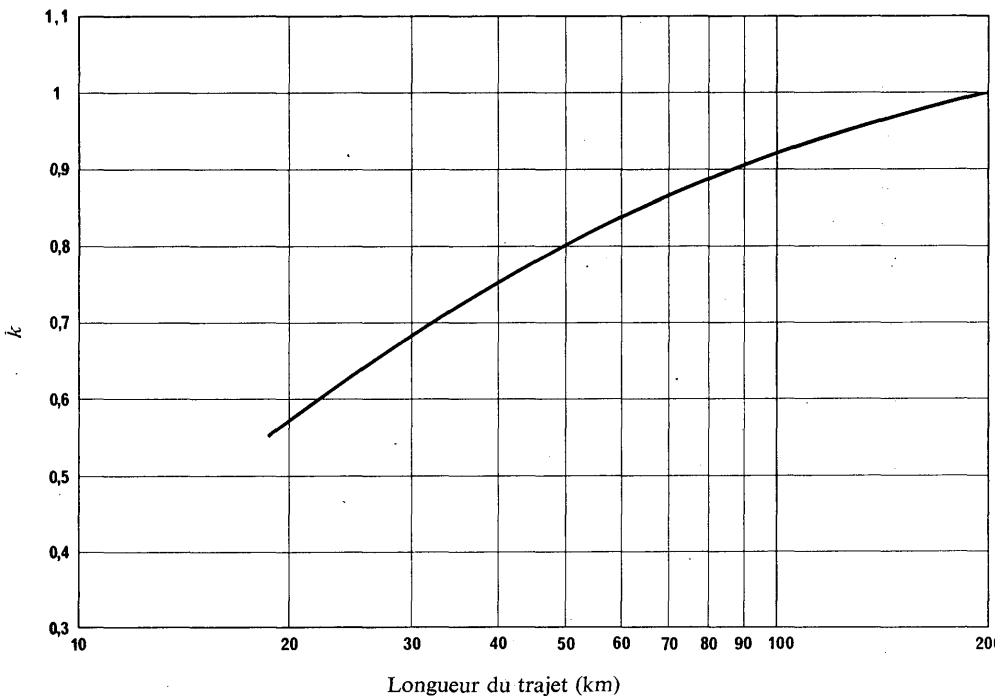


FIGURE 1

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

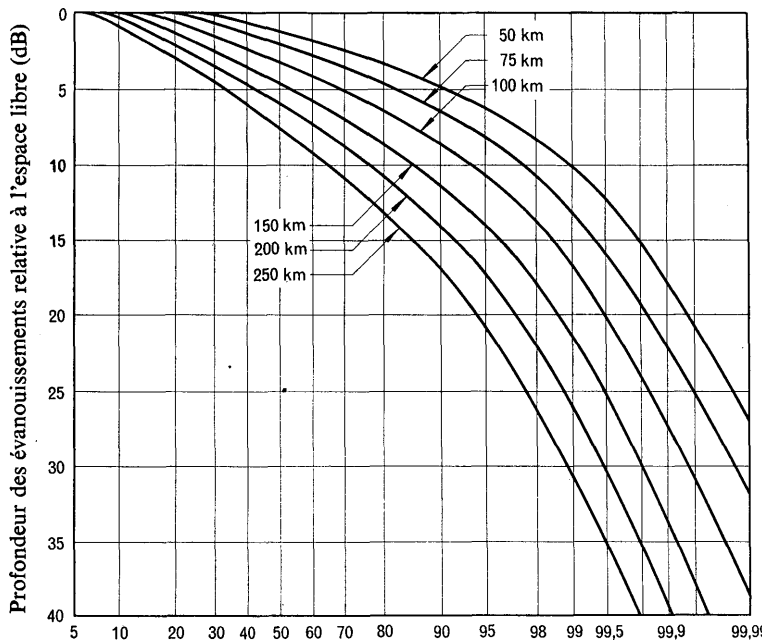


FIGURE 2

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

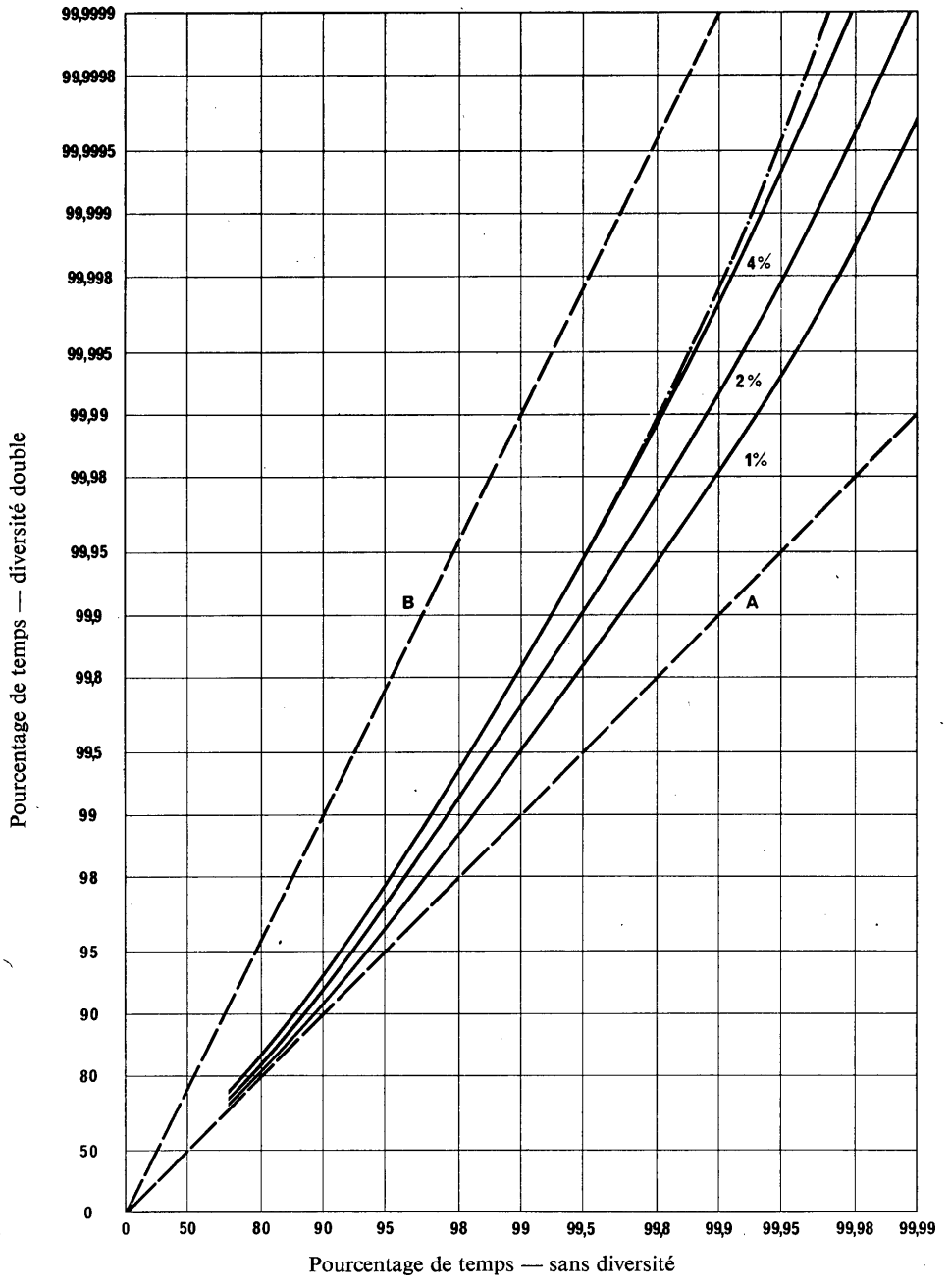


FIGURE 3

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

RAPPORT 424 *

COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES, DÉCIMÉTRIQUES ET CENTIMÉTRIQUES POUR LE SERVICE MOBILE AÉRONAUTIQUE

(Programme d'études 7A/5)

(1970)

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 370-1 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 [1]. 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 244-2).

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.

---

* Ce Rapport a été 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_b 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 239-2, il est indiqué comment on doit procéder pour interpoler entre les hauteurs d'antenne données.

Bibliographie

1. Rice, P.L., Longley, A.G., Norton, K.A. et Barsis, A.P. Transmission loss predictions for tropospheric communications circuits. Vol. I and II, NBS Technical Note 101 (révision de 1967).

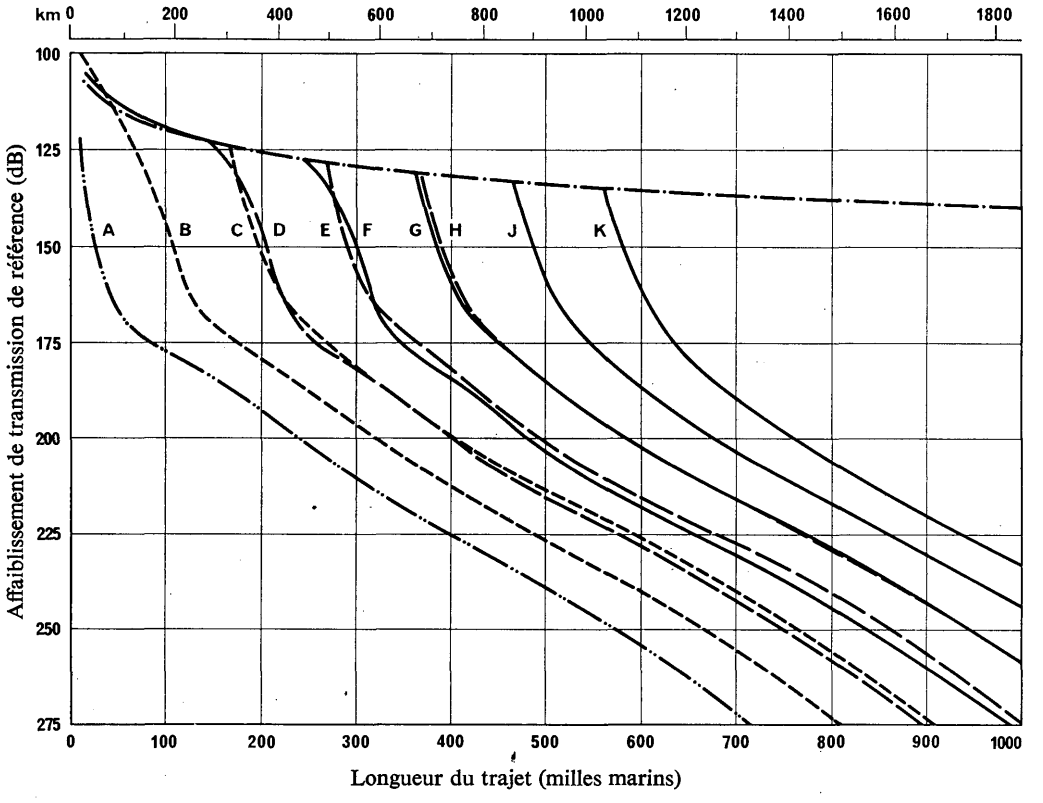


FIGURE 1

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

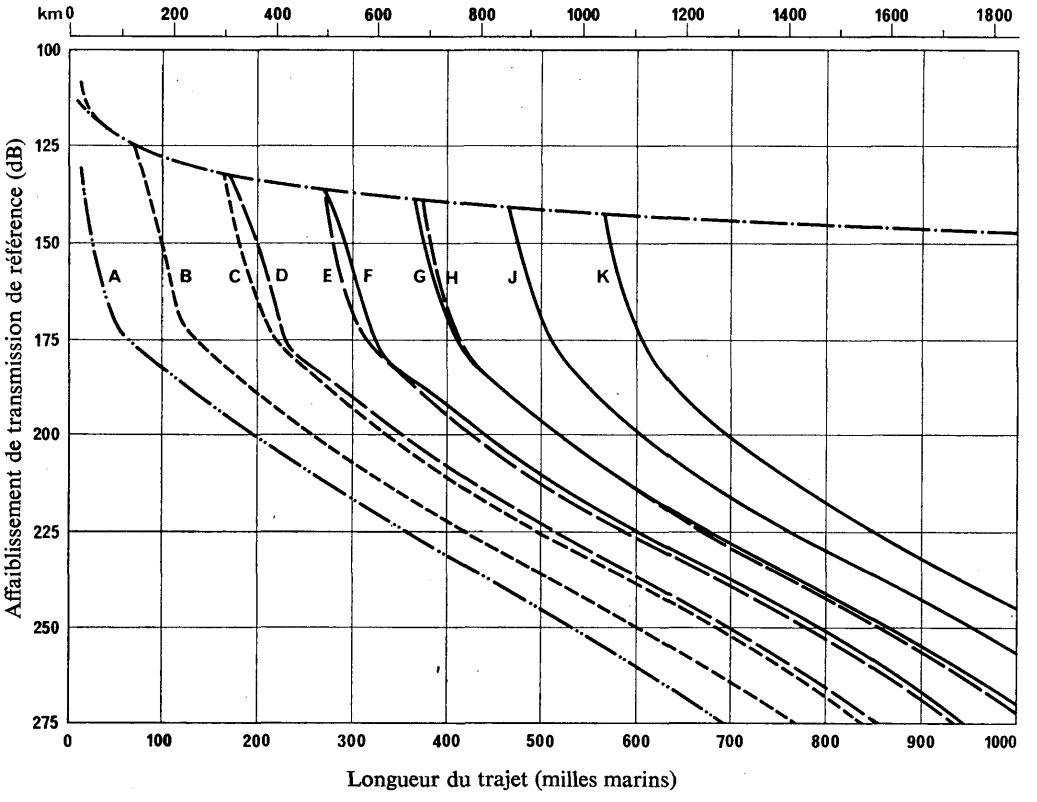


FIGURE 2

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

——— 7 620 m 25 000 feet

- - - - - - 1 524 m 5 000 feet

—·—·— 15,2 m 50 feet

—·—·— Espace libre

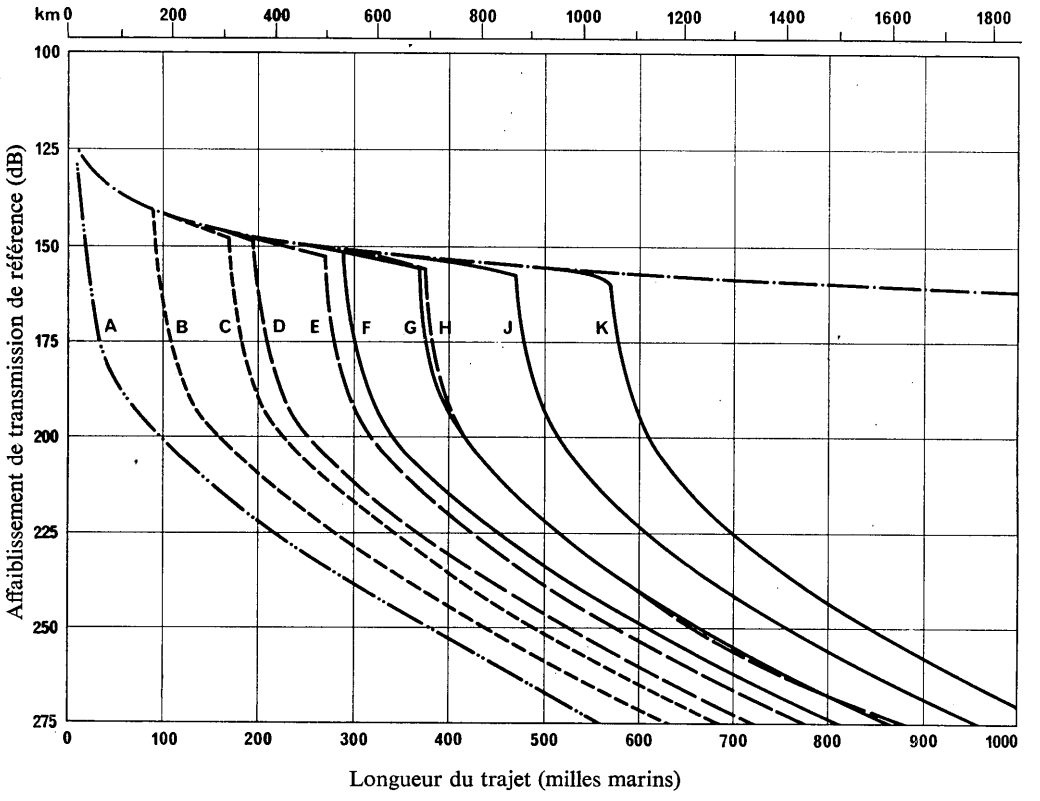


FIGURE 3

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

- - - - - - 1 524 m 5 000 feet

·—·—· 15,2 m 50 feet

·—·—· Espace libre

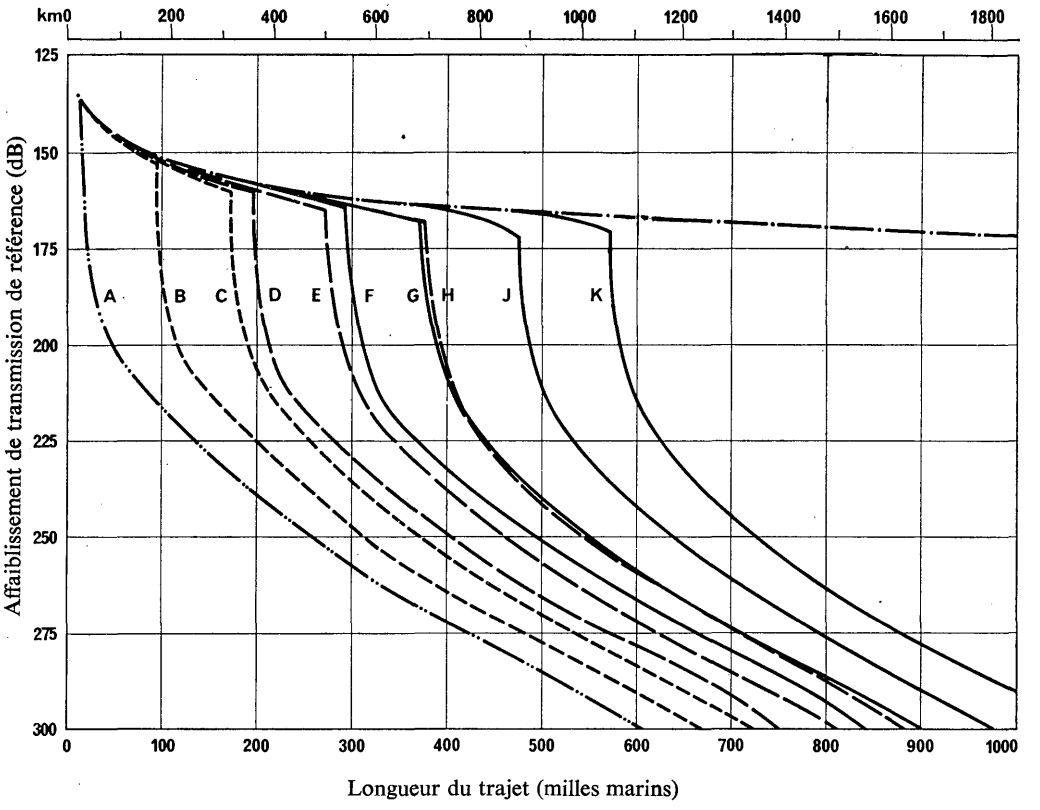


FIGURE 4

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

- - - - - - 1 524 m 5 000 feet

·—·—· 15,2 m 50 feet

·—·—· Espace libre

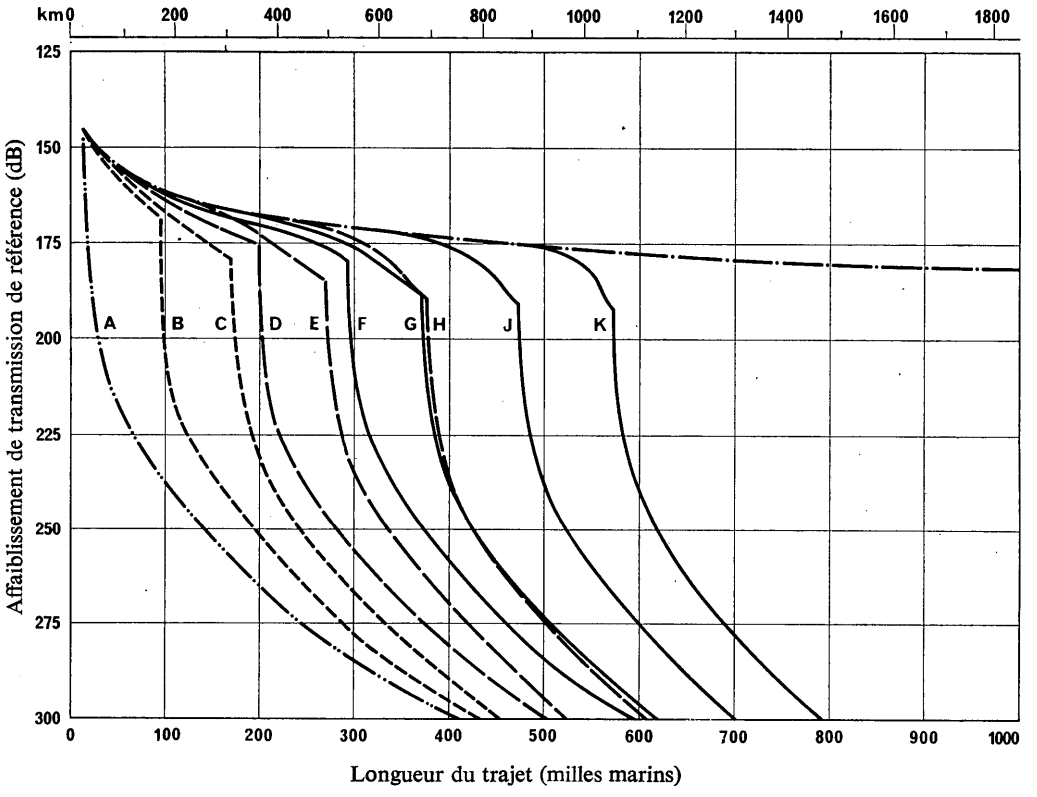


FIGURE 5

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 *

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

(1970)

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 [1, 4] n'est utilisée que pour la radiodiffusion dans la bande 9 (ondes décimétriques), tandis que la méthode B [2] 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 370-1 ou que les méthodes graphiques décrites dans le Rapport 244-2. 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 370-1), 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

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

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:

$$E_T = E_{L,T} + A\,(E_{S,T} - E_{L,T})$$

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 [2] 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

$$d_{Ls} = 4{,}1\,(\sqrt{h_{e1}} + \sqrt{h_{e2}})\ \text{km} \qquad (1)$$

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 233-2.

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 [1] et [2]. 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_g. 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 233-2);

— rayon terrestre équivalent, a, ou $a(N_s)$, qui est une fonction de N_s [2];

— 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 370-1. 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 :

$$\Delta h = \Delta h_m(d) / [1 - 0{,}8 \exp(-0{,}02d)] \text{ mètres} \qquad (2)$$

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: $d, f, h_{g1}, h_{g2}, h_{e1}, h_{e2}, \sigma, \varepsilon, N_s, a, d_{L1}, d_{L2}, \theta_e, \Delta h(d), \Delta h$ 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 [2], 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.

BIBLIOGRAPHIE

1. 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.*
2. LONGLEY, A. G. et RICE, P. L. Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method — ESSA, U. S. Department of Commerce, Tech. Report ERL 79/ITS 67 (1968).
3. *NBS*, Technical Note 101, révisée (janvier 1967).
4. CAUSEBROOK, J.H., DAVIS, B. et SANDELL, R.S. 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.

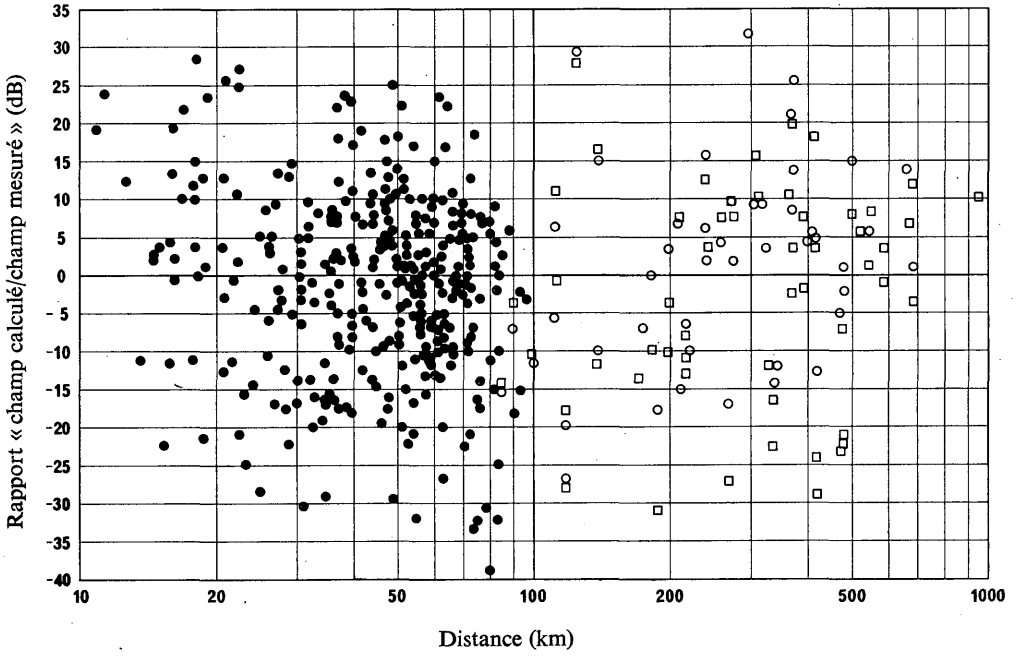


FIGURE 1

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

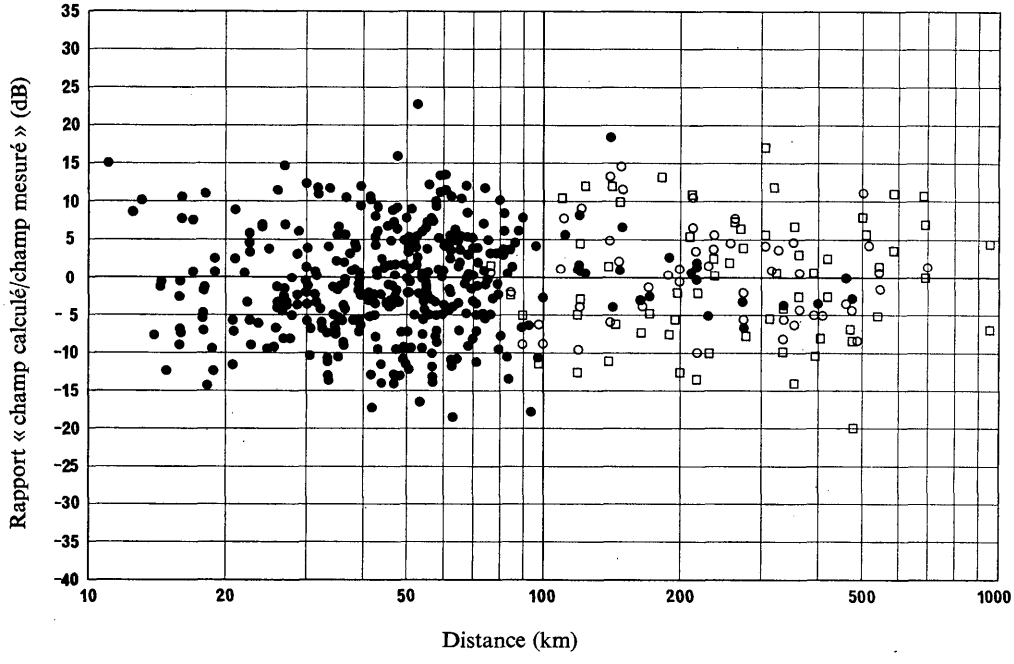


FIGURE 2

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

o = 5% du temps

□ = 1% du temps

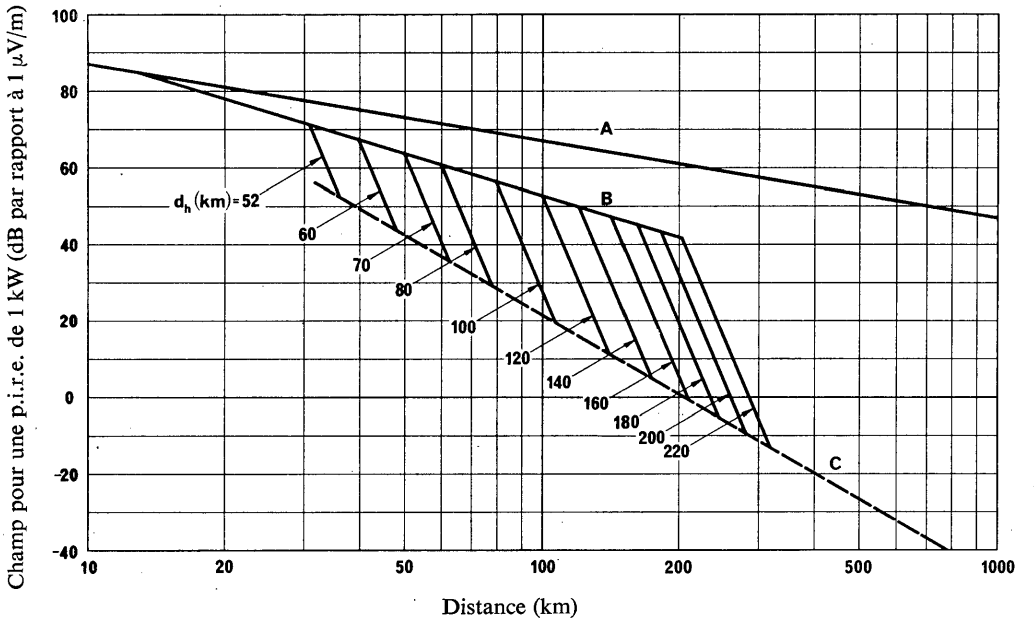


FIGURE 3

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

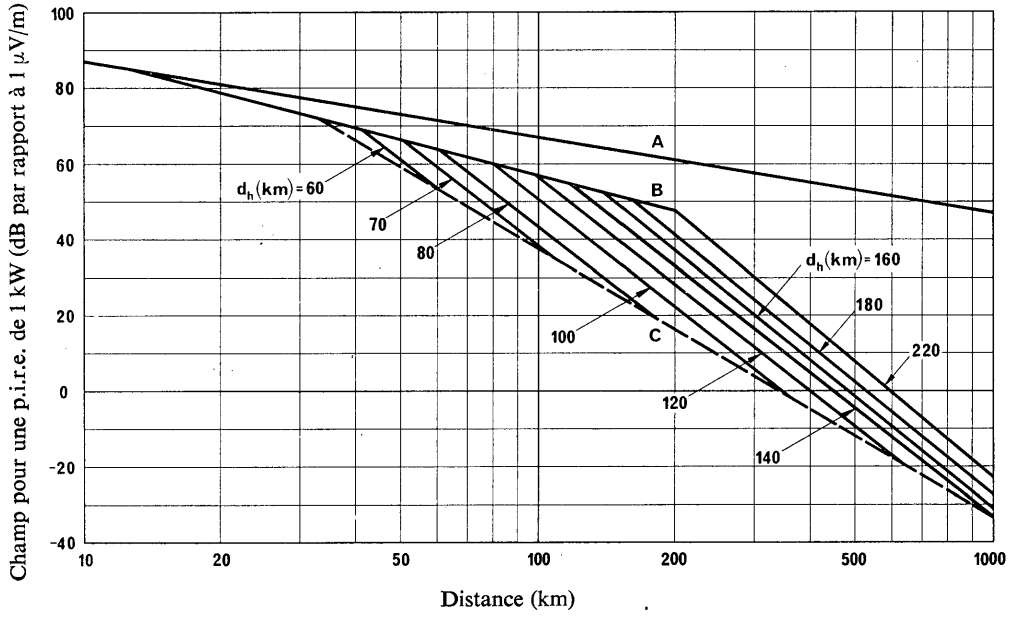


FIGURE 4

Champ en fonction de la distance — Trajet terrestre : 5% du temps

Courbes A: Espace libre
B: En deçà de l'horizon
C: Au-delà de l'horizon

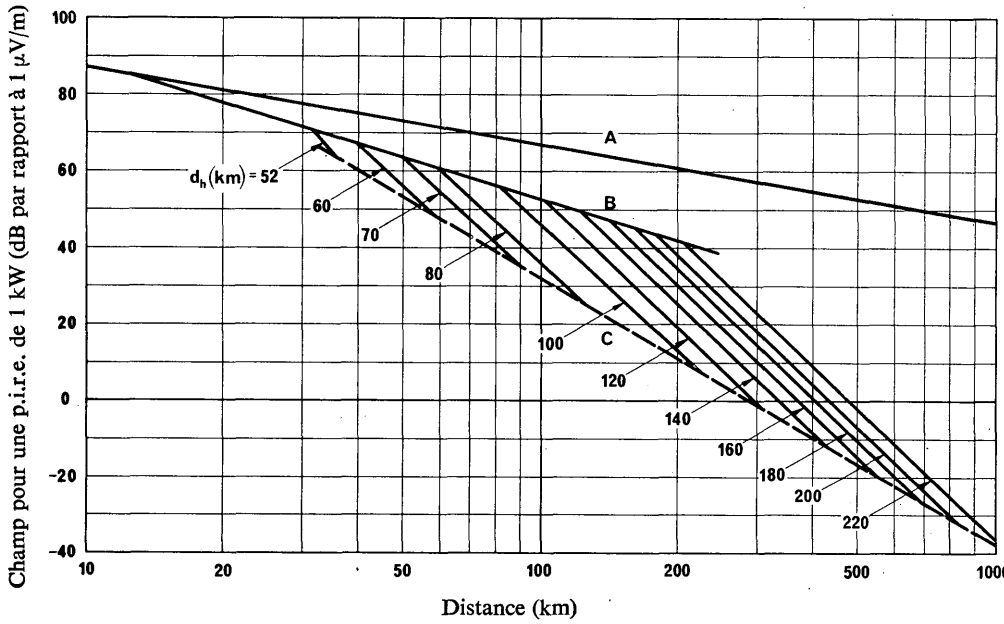


FIGURE 5

Champ en fonction de la distance — Trajet terrestre : 1% du temps

Courbes A: Espace libre
B: En deçà de l'horizon
C: Au-delà de l'horizon

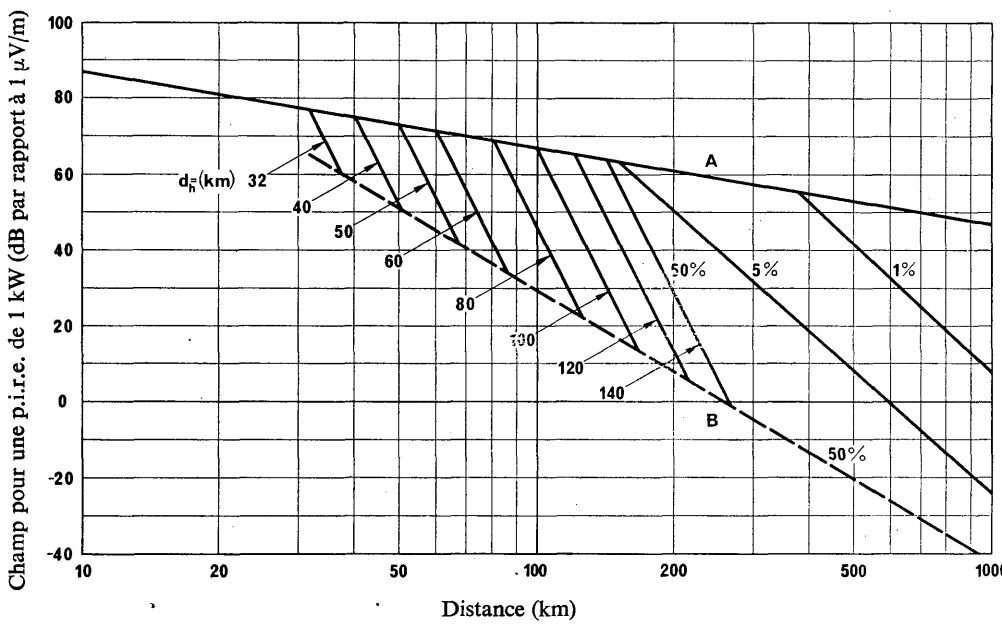


FIGURE 6

Champ en fonction de la distance — Trajet maritime

Courbes A: Espace libre
B: Au-delà de l'horizon

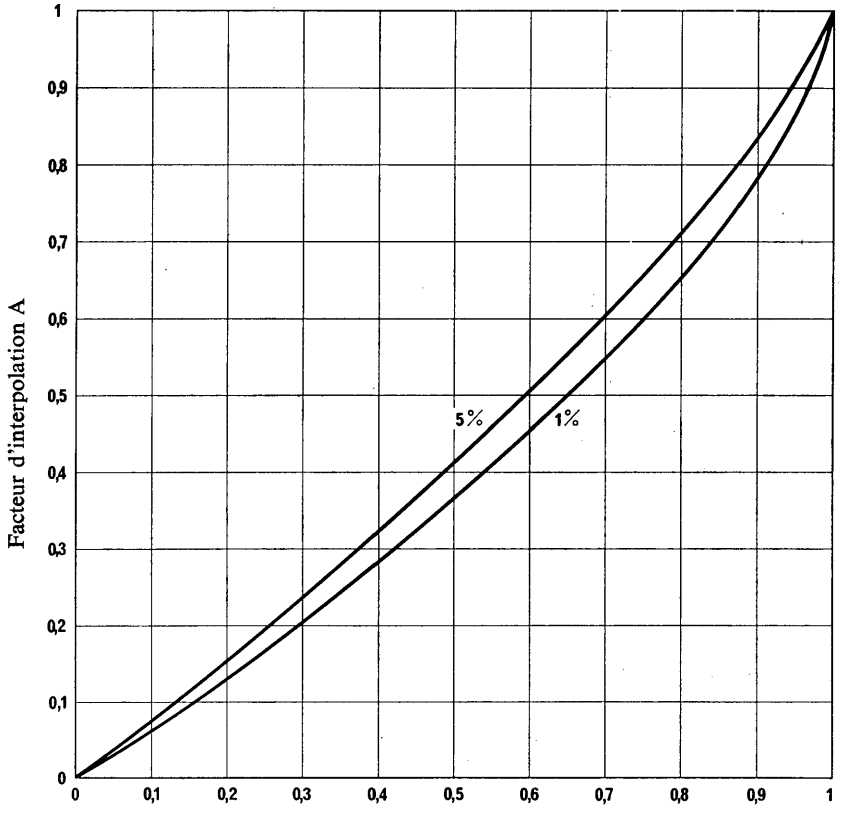


FIGURE 7

Interpolation pour des trajets mixtes terre-mer

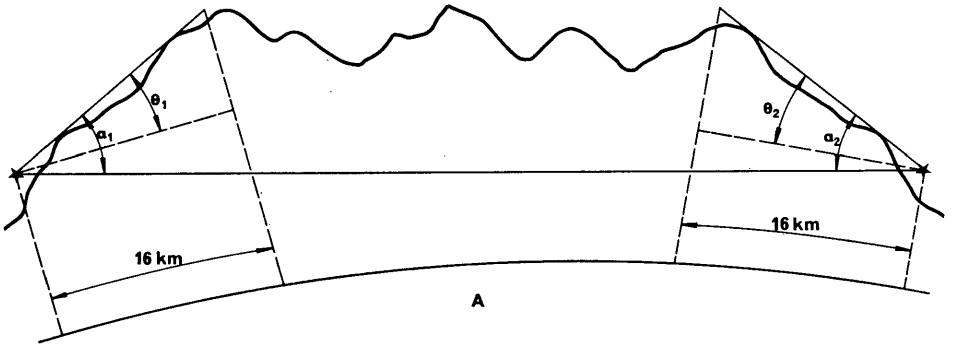


FIGURE 8

Géométrie du trajet :
A = *Niveau de la mer*

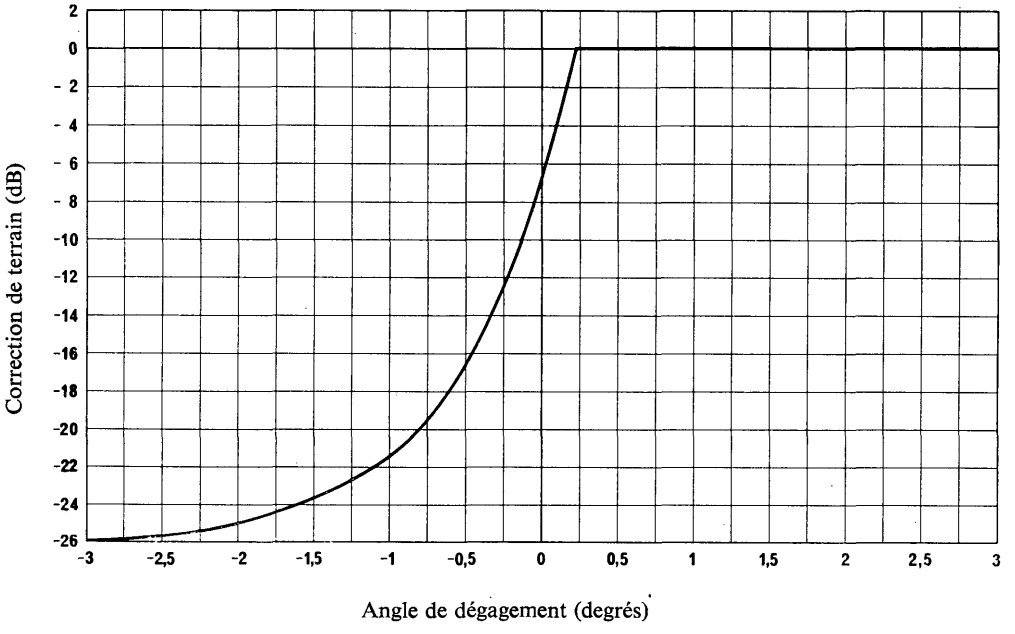


FIGURE 9

Correction de terrain

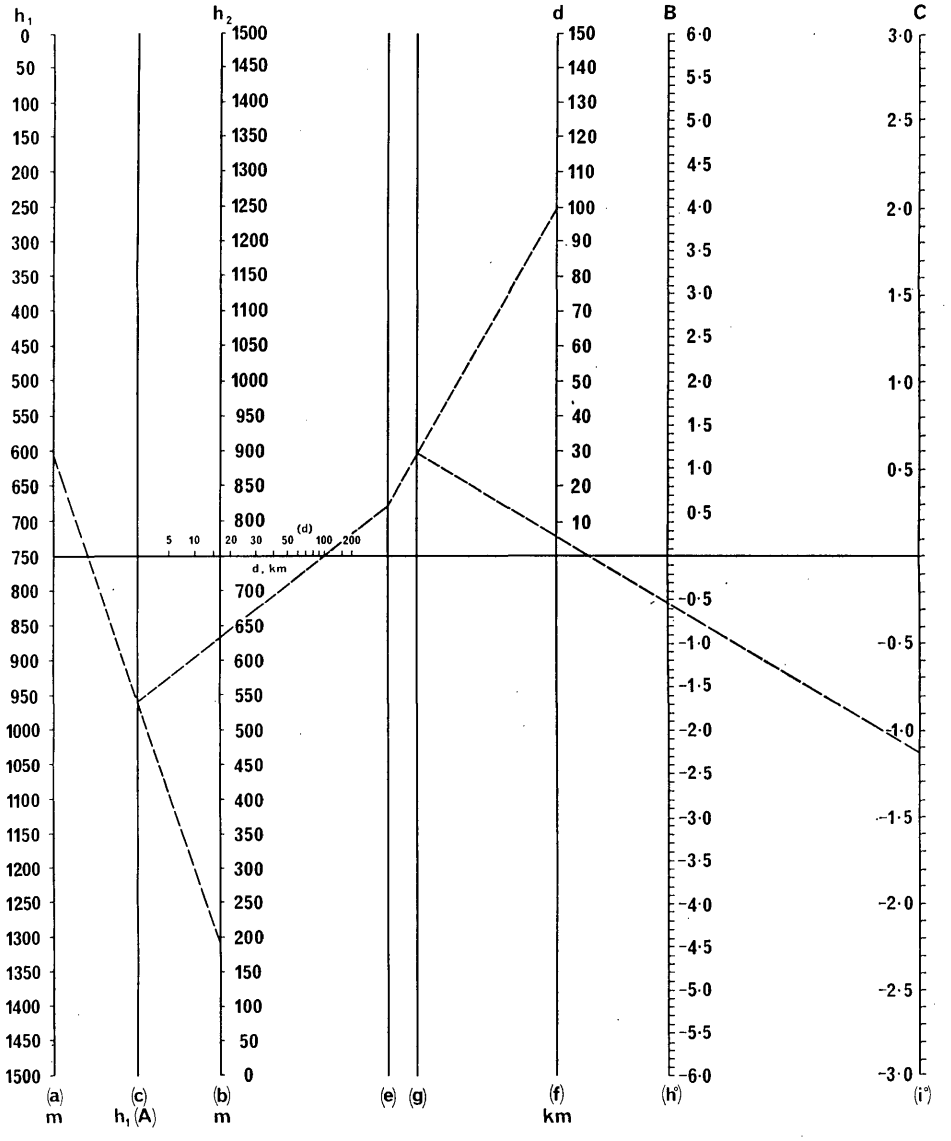


FIGURE 10

Nomogramme pour « l'angle redéfini »

A: Hauteur à l'extrémité à « redéfinir »
B: Angle de dégagement du terrain (en degrés à partir de l'horizontale)
C: « angle redéfini » α

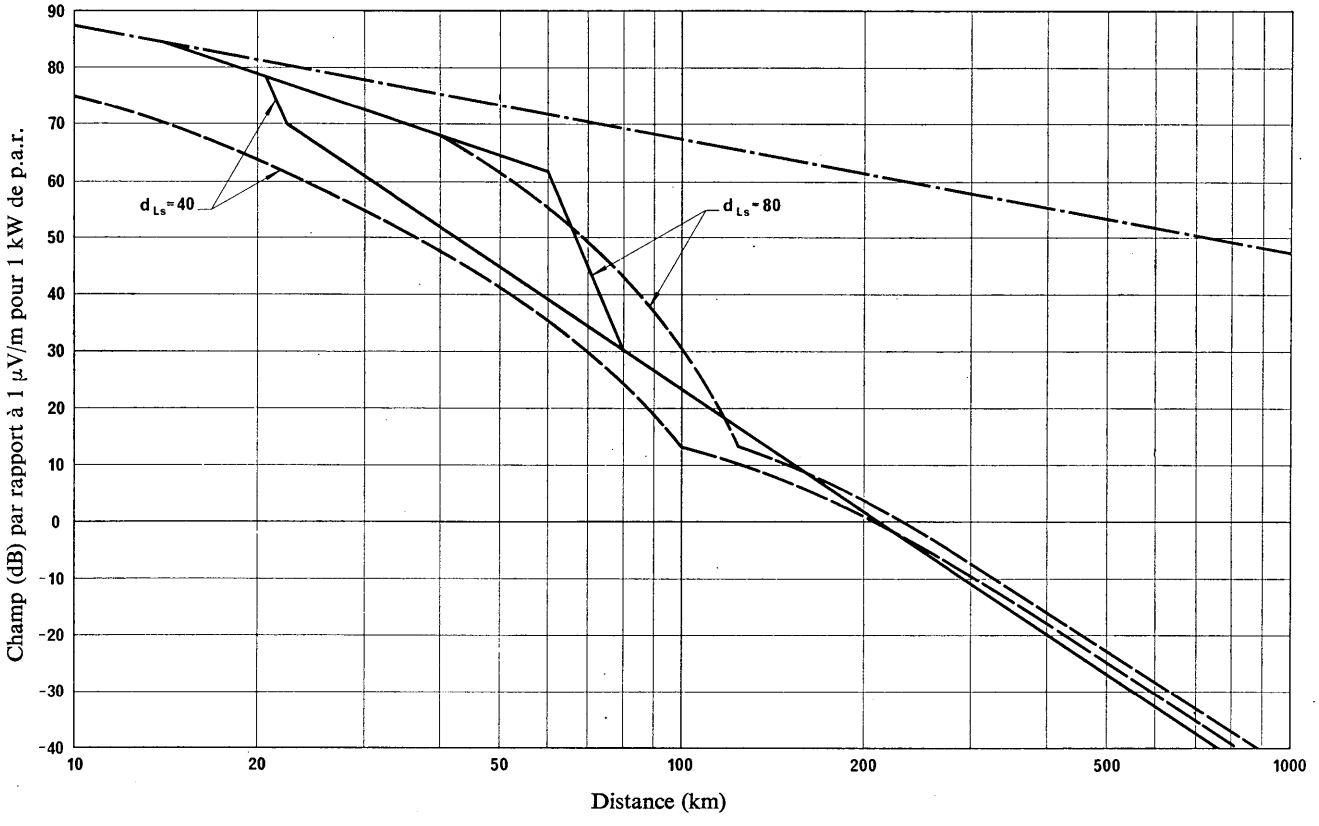


FIGURE 11

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

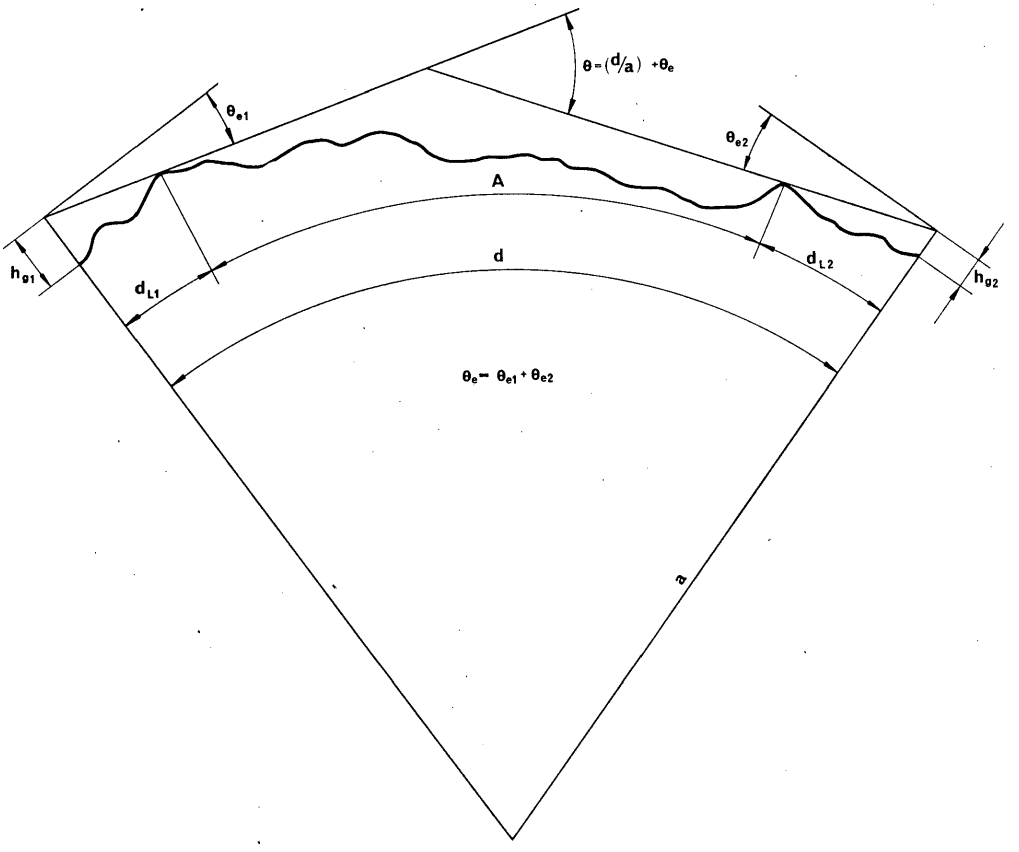


FIGURE 12

Géométrie d'un trajet radioélectrique transhorizon

A: Niveau de la mer

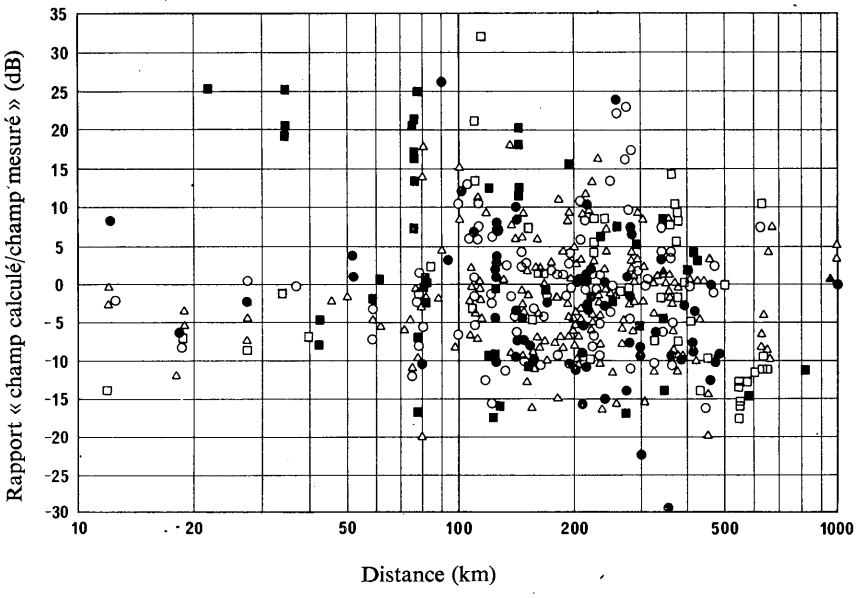


FIGURE 13

Représentation du rapport « champ calculé/champ mesuré » en fonction de la distance

(Calcul à l'ordinateur selon la « Méthode B »)

Fréquence (MHz):

- △ <110;
- ○ 110-299;
- ● 300-699;
- □ 700-1100;
- ■ >1100;

$N = 780$

SECTION 5B : RADIOMÉTÉOROLOGIE

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 310-2

DÉFINITIONS DE TERMES SE RAPPORTANT A LA PROPAGATION DANS LA TROPOSPHÈRE

(1951 - 1959 - 1966 - 1970)

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 condition 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 TROPOSPHÉRIQUE

Termes	Définitions
1. *Troposphère*	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.
2. *Tropopause*	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. *Inversion de température*	Augmentation de température avec la hauteur.
4. *Rapport de mélange*	Rapport entre la masse de la vapeur d'eau et la masse de l'air sec dans un volume donné d'air (exprimé fréquemment en g/kg).
5. *Humidité relative par rapport à l'eau (ou à la glace)*	Rapport exprimé en pourcentage, entre la tension de vapeur d'eau présente dans l'air humide et la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau (ou à la glace) à la même température et la même pression.
6. *Indice de réfraction* (n)	Rapport entre la vitesse des ondes dans le vide et dans le milieu considéré.
7. *Coïndice (N)*	Excès de n par rapport à l'unité, exprimé en millionièmes.
8. *Unité N*	Unité en laquelle est exprimé le coïndice.
9. *Indice de réfraction modifié*	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. *Module de réfraction*	Excès de l'indice de réfraction modifié par rapport à l'unité, exprimé en millionièmes.
11. *Unité M*	Unité dans laquelle on exprime le module de réfraction.

Termes	Définitions
12. *Gradient normal du module de réfraction*	Variation uniforme du module de réfraction en fonction de la hauteur au-dessus du sol, dont le taux est considéré comme base normale de comparaison. Le gradient considéré comme normal a une valeur de 0,12 unité *M* par mètre (3,6 unités *M* par 100 feet).
13. *Atmosphère radioélectrique normale*	Atmosphère ayant un gradient normal du module de réfraction.
14. *Atmosphère fondamentale de référence*	Atmosphère dont le coïndice (*N*) est une fonction exponentielle décroissante de la hauteur (Avis 369-1).
15. *Réfraction normale*	Réfraction qui se produirait dans l'atmosphère radioélectrique normale (voir Fig. 1).
16. *Infraréfraction*	Réfraction pour laquelle le gradient du module de réfraction est positif et supérieur à la normale (voir Fig. 1).
17. *Superréfraction*	Réfraction pour laquelle le gradient du module de réfraction est inférieur à la normale (voir Fig. 1).
18. *Propagation troposphérique*	L'un quelconque des divers mécanismes de propagation possibles dans la troposphère. Certains de ces mécanismes sont définis ci-dessous.
19. *Propagation normale*	Propagation d'une onde radioélectrique au-dessus d'une terre sphérique régulière, de caractéristiques électriques uniformes, dans les conditions de réfraction atmosphérique normale.
20. *Horizon radioélectrique*	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.
21. *Rayon terrestre équivalent*	Rayon d'une terre sphérique fictive pour laquelle la distance à l'horizon radioélectrique, en admettant une propagation rectiligne, est la même que sur la Terre réelle entourée d'une atmosphère dont le gradient vertical de l'indice de réfraction est constant (pour l'atmosphère radioélectrique normale, le rayon terrestre équivalent est égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre).
22. *Conduit troposphérique radioélectrique*	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.
23. *Conduit au sol (Conduit de surface)*	Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au sol.
24. *Conduit élevé*	Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au-dessus du sol.
25. *Epaisseur du conduit*	Différence d'altitude entre les surfaces limites, inférieure et supérieure, d'un conduit troposphérique.
26. *Hauteur du conduit*	Hauteur au-dessus du sol de la surface inférieure d'un conduit élevé.
27. *Propagation guidée (mode guidé)*	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).
28. *Propagation transhorizon*	Terme générique désignant la 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.
29. *Propagation par diffusion troposphérique*	Propagation mettant en jeu la diffusion par de nombreuses inhomogénéités ou discontinuités de l'indice de réfraction de l'atmosphère, généralement caractérisé par un affaiblissement qui augmente rapidement lorsque la direction s'écarte de la direction incidente.

Termes	Définitions
30. *Propagation par diffusion par les précipitations*	Propagation due à la diffusion par les particules des précipitations.
31. *Propagation par trajets multiples*	Propagation par un certain nombre de trajets de transmission.

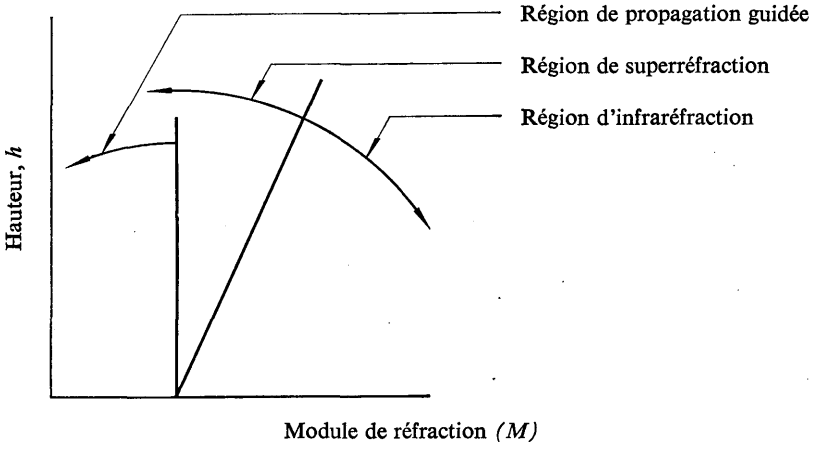


FIGURE 1

Courbes M

AVIS 369-1

DÉFINITION D'UNE ATMOSPHÈRE FONDAMENTALE DE RÉFÉRENCE

Le C.C.I.R., (1959 – 1963 – 1966)

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 (voir Rapport 231-2),

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 2-1/5)

Le C.C.I.R., (1970)

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).

---

* Cet Avis annule le Rapport 232.

5B: *Rapports*

RAPPORT 231-2 *

ATMOSPHÈRES DE RÉFÉRENCE

(Question 2-1/5)

(1959 – 1963 – 1966 – 1970)

Atmosphères de référence pour le calcul des caractéristiques de propagation

Pour le calcul de certaines caractéristiques de propagation, il faut spécifier, d'une part, la courbe de variation de l'indice de réfraction n de l'air en fonction de la hauteur h au-dessus de la surface de la Terre et, d'autre part, les caractéristiques du sol. Jusqu'à une date récente, la plupart des calculs du champ, de la phase et de la courbure de la trajectoire des ondes se faisaient en admettant que le gradient de l'indice de réfraction en fonction de la hauteur était constant et 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:

$$k = \left(1 + \frac{a}{n} \cdot \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h}\right)^{-1} \tag{1}$$

On a été amené dernièrement à étendre les calculs des caractéristiques de propagation aux régions où l'hypothèse d'un gradient constant ne représente pas une description satisfaisante de l'atmosphère; cette hypothèse conduirait à la possibilité d'erreurs importantes dans le calcul du champ à de hautes altitudes ou dans le calcul de la phase à des fréquences peu élevées.

On a observé que les variations de l'indice de réfraction moyen de l'air peuvent être fréquemment représentées, avec une bonne approximation, par l'expression exponentielle suivante [1, 2]:

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

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:

$$\mathrm{e}^{-b} = 1 + \frac{\Delta N}{N_s} \tag{3}$$

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 [2, 3, 4, 5] 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:

$\Delta N = -7{,}32 \exp(0{,}005577\ N_s)$ aux Etats-Unis d'Amérique [2] (4)

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

$\Delta N = -3{,}95 \exp(0{,}0072\ N_s)$ au Royaume-Uni [4] (6)

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

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): $k = 4/3$ 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

$$n(h) = 1 + 315 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0{,}136h} \qquad (7)$$

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 de N_s, dans les équations (2) et (3) et de déterminer ainsi les caractéristiques de l'atmosphère.

En résumé, les formules données ci-dessus définissent une méthode d'estimation des courbes de l'indice de réfraction moyen pour une position géographique quelconque. Lorsqu'on connaît à la fois les valeurs moyennes de ΔN et de N_s, on peut porter ces valeurs dans (2) et (3); en revanche, si on connaît uniquement N_s, on peut se servir de l'équation (4) pour trouver ΔN. Dans ce dernier cas, la méthode employée postule que l'hypothèse faite plus haut sur la corrélation entre ΔN et N_s est valable.

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.

S'il était nécessaire de définir $n(h)$ avec plus de précision, on pourrait se référer aux tableaux très complets qui se trouvent dans la documentation indiquée sous la référence [6], où sont présentées, pour chaque mois de l'année, des cartes qui donnent, à l'échelle mondiale, les composantes sèches et humides de $n(h)$.

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 [6, 7, 8].

Bibliographie

1. Misme, P. Essai de radioclimatologie dans le nord de la France. *Annales des télécommunications*, T. 13, Vol. 11-12 (1958).
2. Bean, B.R. et Thayer, G.D. On models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, **47**, 740-755 (1959).
3. Du Castel, F. et Misme, P. Eléments de radioclimatologie. *Onde électrique* (décembre 1957).
4. Lane, J.A. The radio refractive index gradient over the British Isles. *Journal of Atmos. and Terr. Phys.*, Vol. 21, 157-166 (1961).
5. Bean, B.R., Fehlhaber, L. et Grosskopf, J. 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 (1962).
6. Bean, B.R., Cahoon, B.A., Samson, C.A. et Thayer, G.D. A world-wide Atlas of Radio Refractive Index Monograph No. 1, Environmental Sciences Services Administration, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C. (1966).
7. Wickerts, S. Atmosphère radiométéorologique normale (en suédois). Institut de recherche du Ministère de la Défense nationale, Dep. 3, Rapport A 3704-60 (1968).
8. Pawlowski, W. 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** (1967).

RAPPORT 233-2 *

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

Propagation sol-sol

(Question 2-1/5)

(1959 – 1963 – 1966 – 1970)

1. Introduction

Après avoir discuté de l'influence de l'atmosphère sur la propagation et du choix des paramètres radiométéorologiques, ce Rapport donne les cartes des caractéristiques de l'indice de réfraction à l'usage des problèmes pratiques de propagation.

On constate que les problèmes de propagation dans lesquels l'atmosphère intervient peuvent être classés de plusieurs façons différentes:

1.1 *En fonction de l'élément à mesurer*, par exemple, une distance, un angle, un affaiblissement de transmission:

— 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.

1.2 *En fonction de l'angle sous lequel on traverse l'atmosphère*

Si la trajectoire traverse l'atmosphère sous un angle de site relativement grand, par exemple liaison avec satellite, l'atmosphère n'intervient que comme un terme correctif par rapport à la propagation dans le vide. Ce terme est faible pour les angles de site élevés, mais devient difficile à calculer avec précision pour les petits angles de site que l'on cherche à éviter pour cette raison. Un modèle simple d'atmosphère est généralement suffisant pour évaluer cette correction.

Si la trajectoire reste en permanence dans les basses couches de l'atmosphère, par exemple liaison par faisceaux hertziens, l'atmosphère joue un rôle prépondérant, surtout pour des faisceaux hertziens transhorizon (autres que par diffraction) pour lesquels il n'y aurait pas de liaison possible s'il n'y avait pas d'atmosphère. Dans ce cas, si un modèle d'atmosphère peut être envisagé, il serait complètement différent du précédent.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

2. 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 [1, 2, 3, 4].

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 [5].

On a essayé d'améliorer la corrélation entre le gradient dans les couches inférieures et les caractéristiques du champ en tenant compte des conditions de l'atmosphère au voisinage du volume commun. On a étudié [6, 7, 8 et 9] 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 [11].

On a montré qu'un paramètre de la forme $T = aG_e + bG_c$ est représentatif de la moyenne mensuelle de l'affaiblissement de propagation pour des distances et des climats très différents [10]. 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_c 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.

On a aussi étudié une fonction de l'indice de réfraction potentiel [12]. On peut remarquer que le gradient de cet indice potentiel est théoriquement lié à la mesure de la stabilité atmosphérique.

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 [2, 13, 14, 15] au moins pour les valeurs moyennes mensuelles [25]. 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 231-2.

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 [16, 17]; 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 [2, 13, 14, 15]. 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 [18, 19]; d'autres mesures révèlent une mauvaise corrélation [20]. 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 [22] 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, on peut souvent écrire:

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

On a trouvé expérimentalement:

$\alpha_1 = 0{,}2$ aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon,

$= 0{,}6$ en France et en République Fédérale d'Allemagne.

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

$\alpha_2 = 0{,}5$ aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon,

$= 0{,}9$ en France, mais certaines années on n'a observé aucune proportionnalité entre ΔA et $\Delta(\Delta N)$,

α_2 n'a été mesuré ni en République Fédérale d'Allémagne 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.

La connaissance des variations de tous les paramètres ci-dessus est importante pour déterminer les probabilités de brouillage entre stations et les formations de guidages atmo-

sphériques pouvant perturber les liaisons en visibilité. Par exemple, les variations des valeurs sur la Terre de l'indice de réfraction apparaissent bien liées à la réfraction des ondes radioélectriques aux Etats-Unis pour des angles de site de 1° au minimum; cependant, pour des angles inférieurs à 0,5°, il faut tenir compte du gradient vertical [19, 21]. 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, aux Fig. 1 à 8, des cartes de ΔN et de N_0 pour certains mois représentatifs (voir au § 3 la définition de N_0).

3. Cartes de l'indice de réfraction au sol

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

Il est notoire que systématiquement N décroît avec l'altitude. 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 rechercher s'il est possible 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 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.

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 l'altitude 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 [15].

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. 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 [23].

4. 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.

5. Etablissement des cartes 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, 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).

6. Cartes du gradient de N au voisinage du sol

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 [24] 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.

Bibliographie

1. Saxton, J.A. Propagation of metre waves beyond the normal horizon. *Proc. I.E.E.*, Part III (1951).
2. Bean, B.R. et Meany, F.M. Some applications of the monthly median refractivity gradient in tropospheric propagation. *Proc. IRE*, 43, **10**, 1419-1431 (octobre 1955).
3. Troitsky, N.V. Evanouissement des ondes ultra-courtes dans les faisceaux hertziens (en russe). *Elektrosviaz*, **10** (1958).
4. C.C.I.R. Doc. V/24 (République Socialiste Tchécoslovaque), 1956-1959.
5. Misme, P. Le gradient équivalent: mesure directe et calcul théorique. *Annales des télécommunications*, Vol. 15, 92 (1960).
6. Bolgiano, R. A theory of wavelength dependence in ultra high frequency transhorizon propagation based on meteorological considerations. *NBS Journal of Research*, Part **D**, **3** (mai-juin 1960).
7. Misme, P. Corrélation entre le champ à grande distance et un nouveau paramètre radiométéorologique. *Transactions of PGAP*, *AP-6*, 3 (1958).
8. Misme, P. Influence du gradient équivalent et rôle de la stabilité atmosphérique dans les liaisons transhorizon au Sahara et au Congo. *Annales des télécommunications*, Vol. 16, **5-6** (1961).
9. Fukushima, M. 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 (août 1967).
10. Battesti, J., Boithias, L. et Misme, P. Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques. *Annales des télécommunications* (mai-juin 1968).
11. C.C.I.R. Doc. V/57 (Etats-Unis), 1959-1963.
12. Flavell, R.G. et Lane, J.A. The application of potential refractive index in tropospheric wave propagation. *Journ. of Atm. and Terr. Phys.*, 24 (1962).
13. Misme, P. Essai de radioclimatologie d'altitude dans le nord de la France. *Annales des télécommunications*, Vol. 13, **11-12** (1958).

14. LANE, J.A. The radio refractive index gradient over the British Isles. *Journ. of Atm. and Terr. Phys.*, 21 (1961).

15. MISME, P., BEAN, B.R. et THAYER, G.D. Models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, Vol. 48, **8** (août 1960).

16. PICKARD, G.W. et STETSON, H.T. A study of tropospheric reception at 428 Mc/s and meteorological conditions. *Proc. IRE*, **35** (décembre 1947).

17. BEAN, B.R. Some meteorological effects on scattered radio waves. *IRE, Trans. on Comm. Systems*, CS-4, **1**, 32-38 (mars 1956).

18. ONOE, M. et autres. Results of experiments of long-distance overland propagation of ultra-short waves. *J. Radio Res. Lab.* (Tokyo), 5, **20** (avril 1958).

19. GRAY, R.E. Refractive index of the atmosphere as a factor in tropospheric propagation far beyond the horizon. *Elec. Comm.*, **36**, 60 (1959).

20. BOITHIAS, L. et MISME, P. Limite d'utilisation de l'indice de réfraction au sol. *Annales des télécommunications*, Vol. 19 (novembre-décembre 1964).

21. BEAN, B.R. et CAHOON, B.A. The use of surface weather observations to predict the total atmospheric bending of radio waves at small elevation angles. *Proc. IRE*, Vol. 45, **11** (novembre 1957).

22. BEAN, B.R. et CAHOON, B.A. Correlation of monthly median transmission loss and refractive index profile characteristics. *NBS Journ. of Research*, **65D**, 1 (1961).

23. BEAN, B.R., HORN, J.D. et OZANICH, A.M. Jr. Climatic charts and date of the radio refractive index for the United States and the World. NBS, Monograph 22 (novembre 1960). Supt. of Docs., United States Government Printing Office, Washington 25, D.C.

24. BEAN, B.R., CAHOON, B.A., SAMSON, C.A. et THAYER, G.D. A world-wide Atlas of Radio Refractive Index, Monograph No. 1. Environmental Sciences Services Administration, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. (1966).

25. WICKERTS, S. Atmosphère radiométéorologique normale (en suédois). *Institut de recherche du Ministère de la Défense nationale*, Dépt. 3, Rapport A 3704-60 (1968).

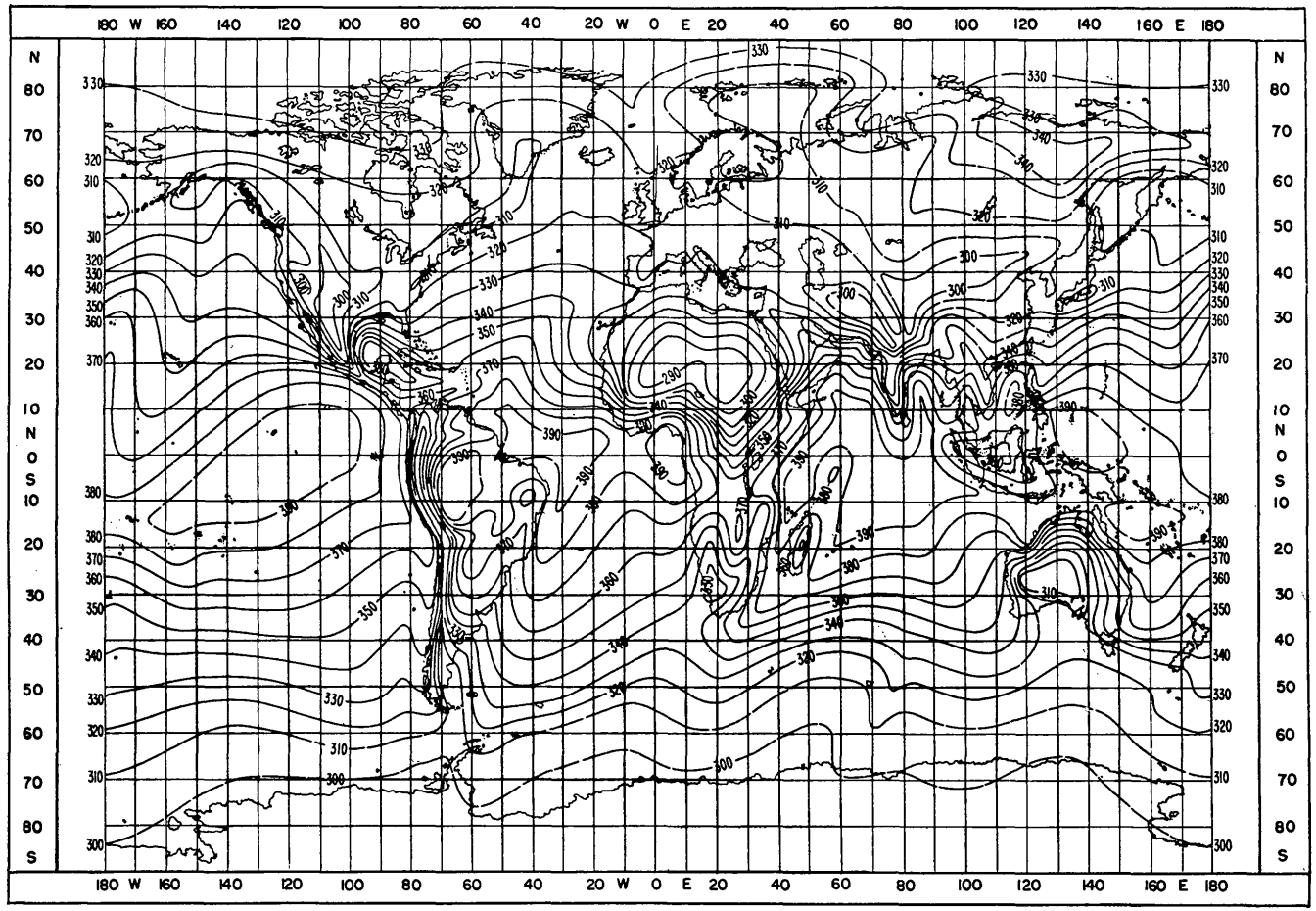


FIGURE 1

Valeur moyenne de N_0 : février

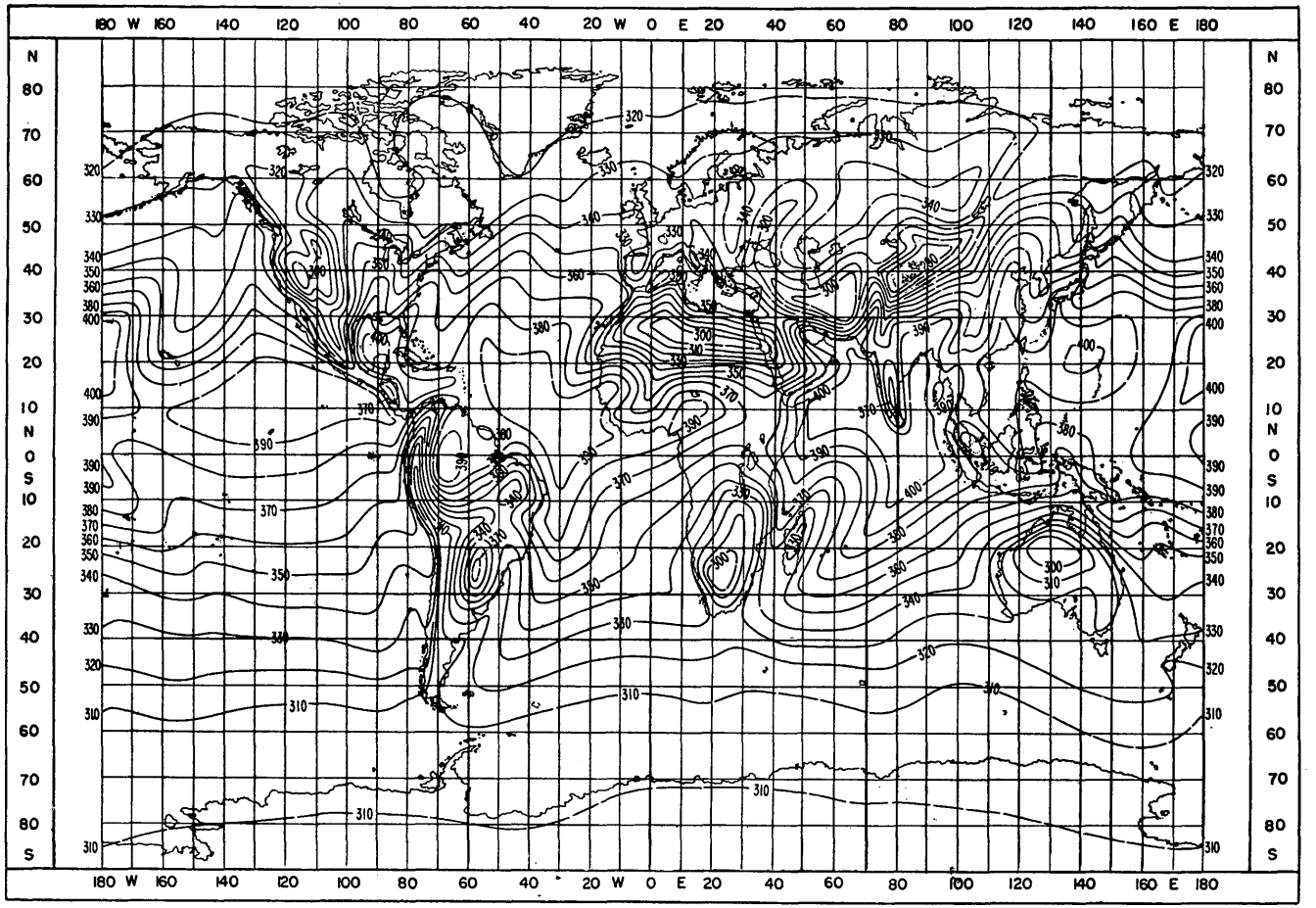


FIGURE 2

Valeur moyenne de N_0 : août

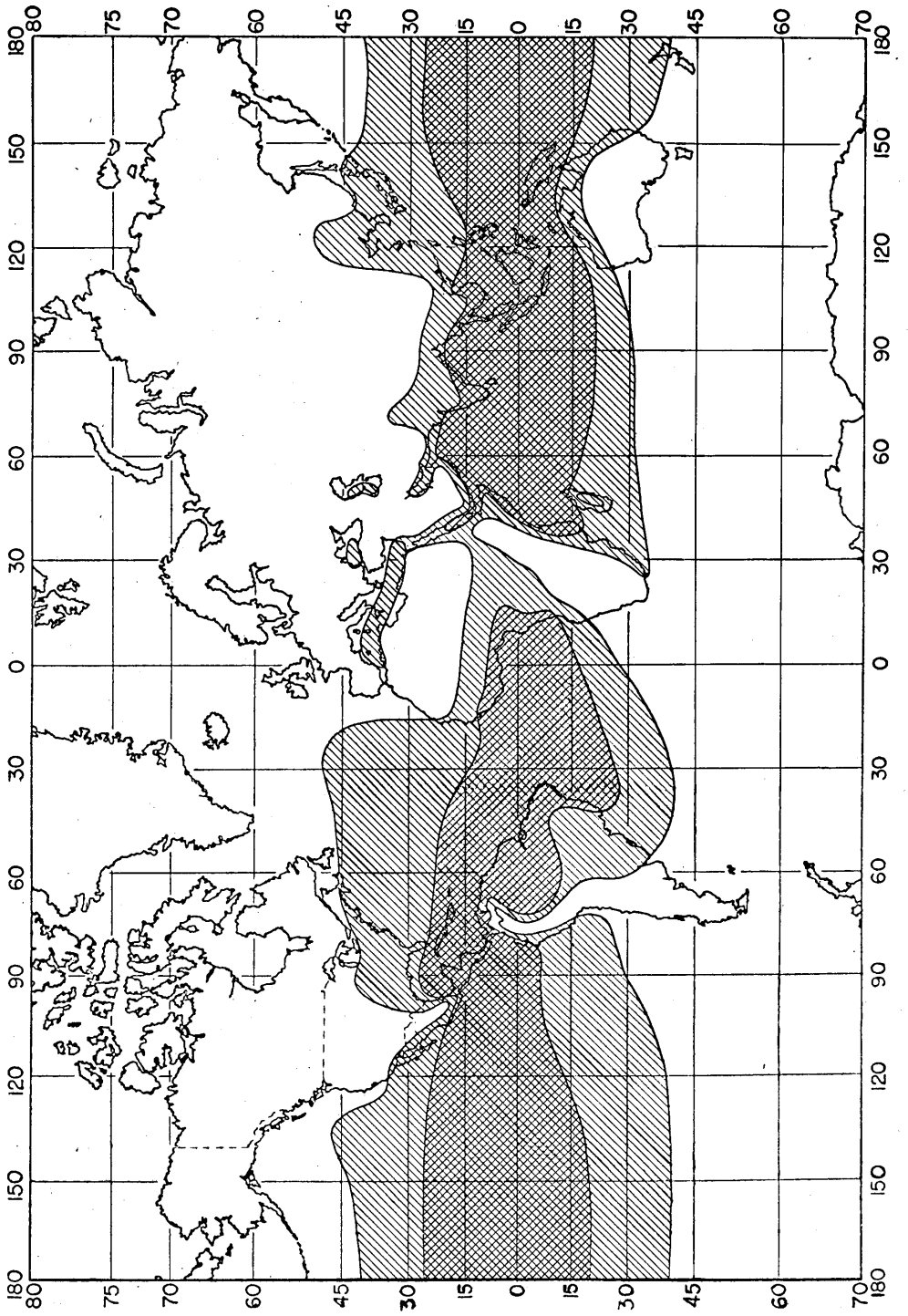


FIGURE 3

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

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

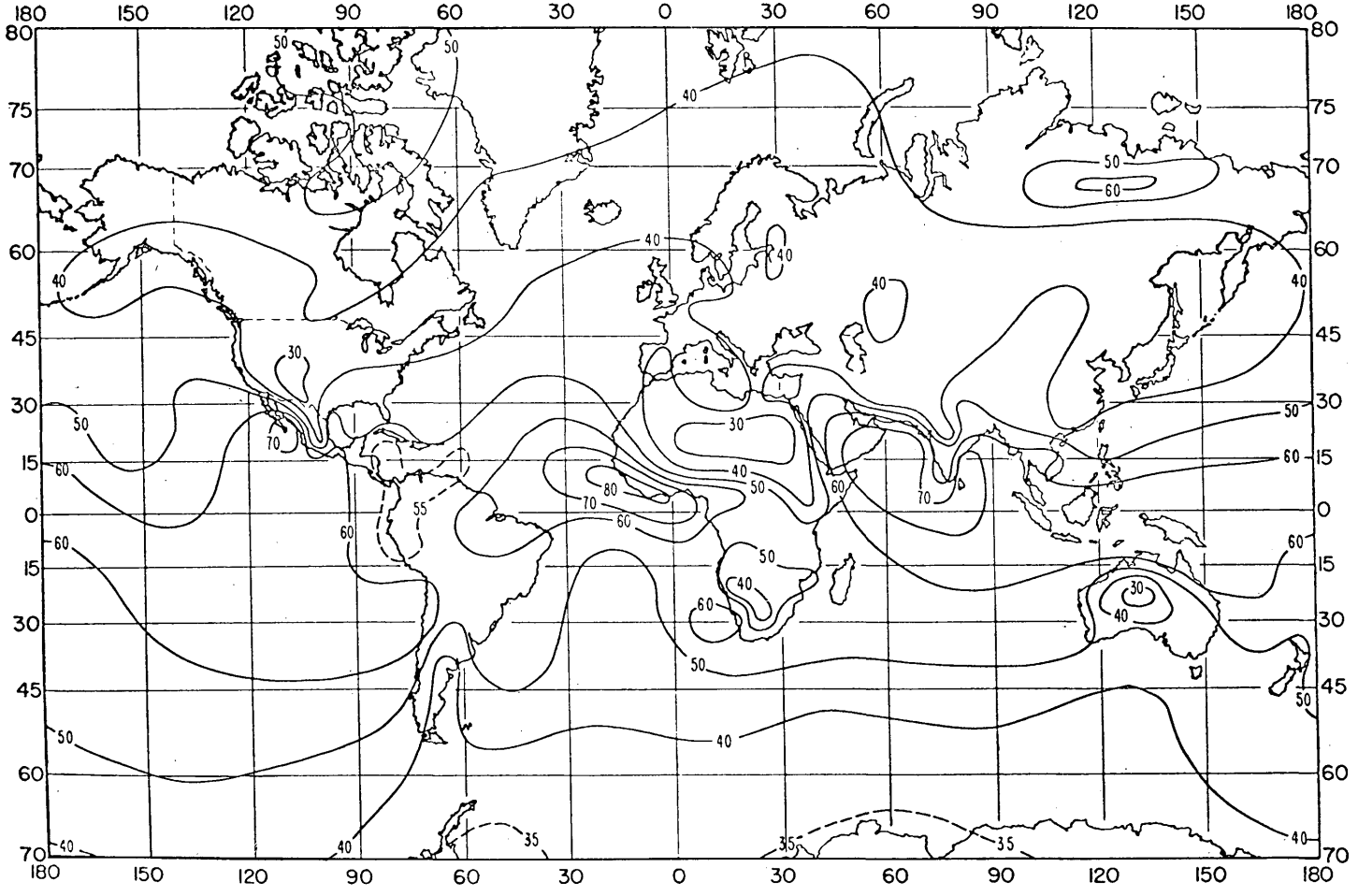


FIGURE 4

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : février

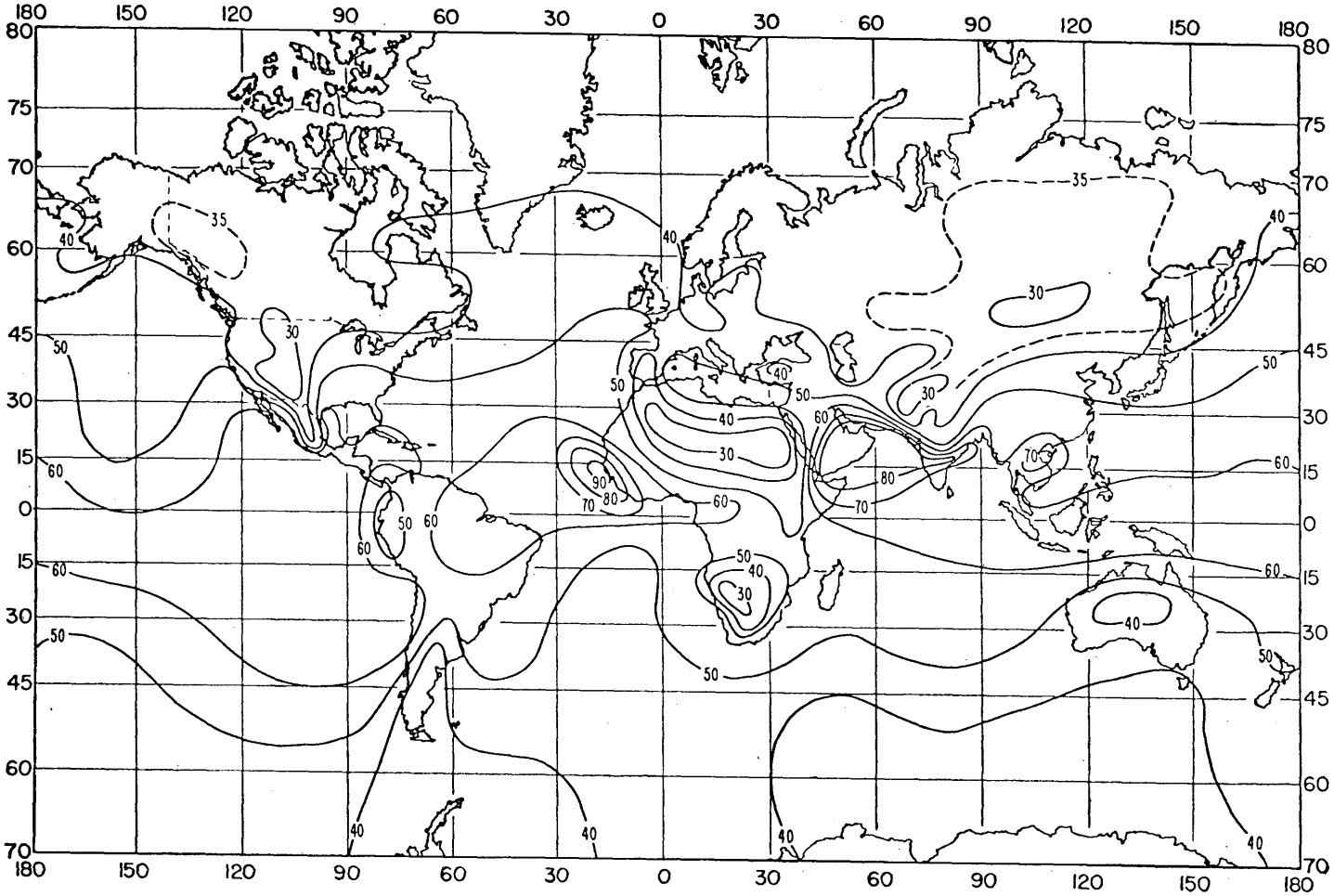


FIGURE 5

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : mai

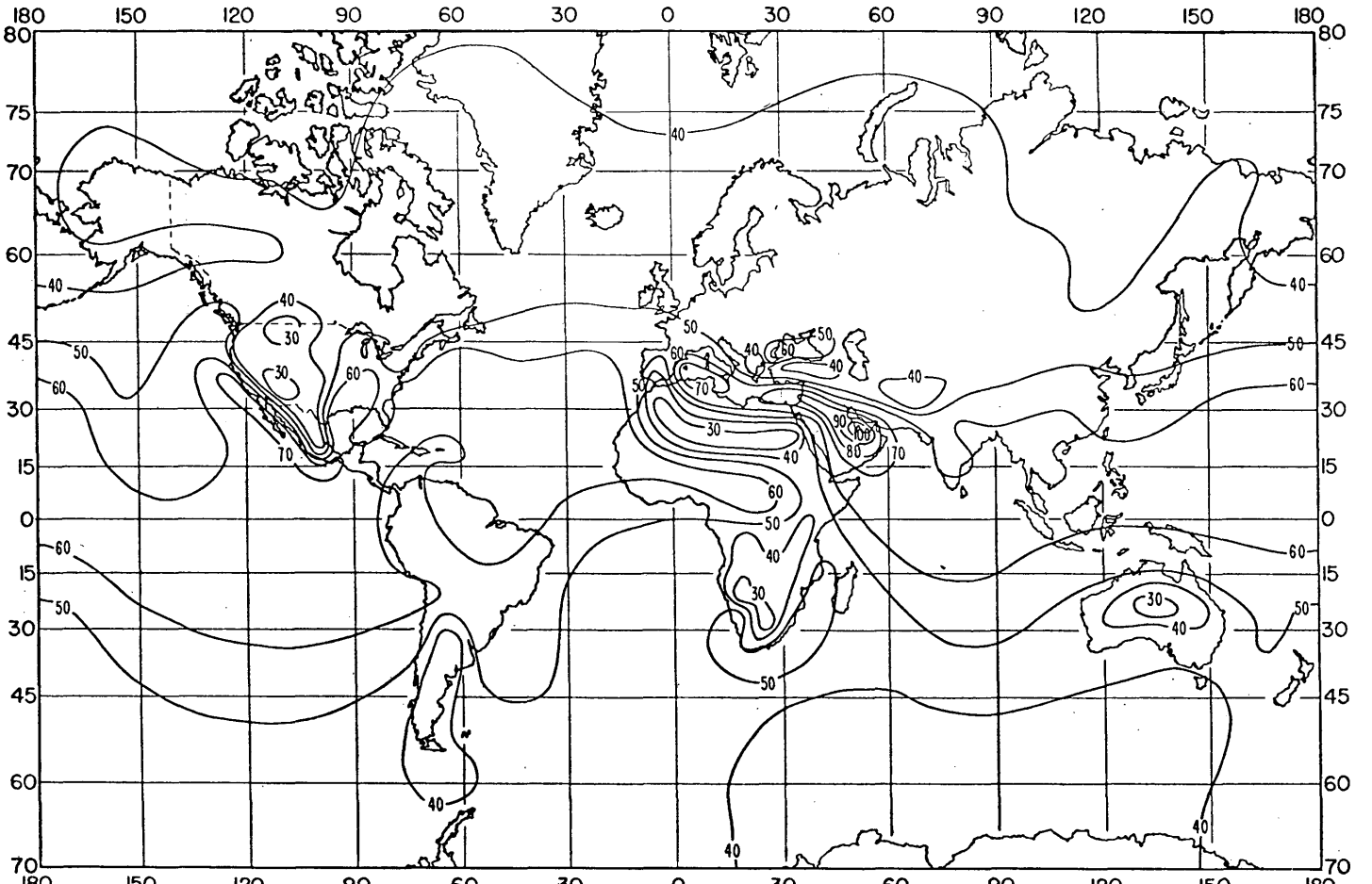


FIGURE 6

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : août

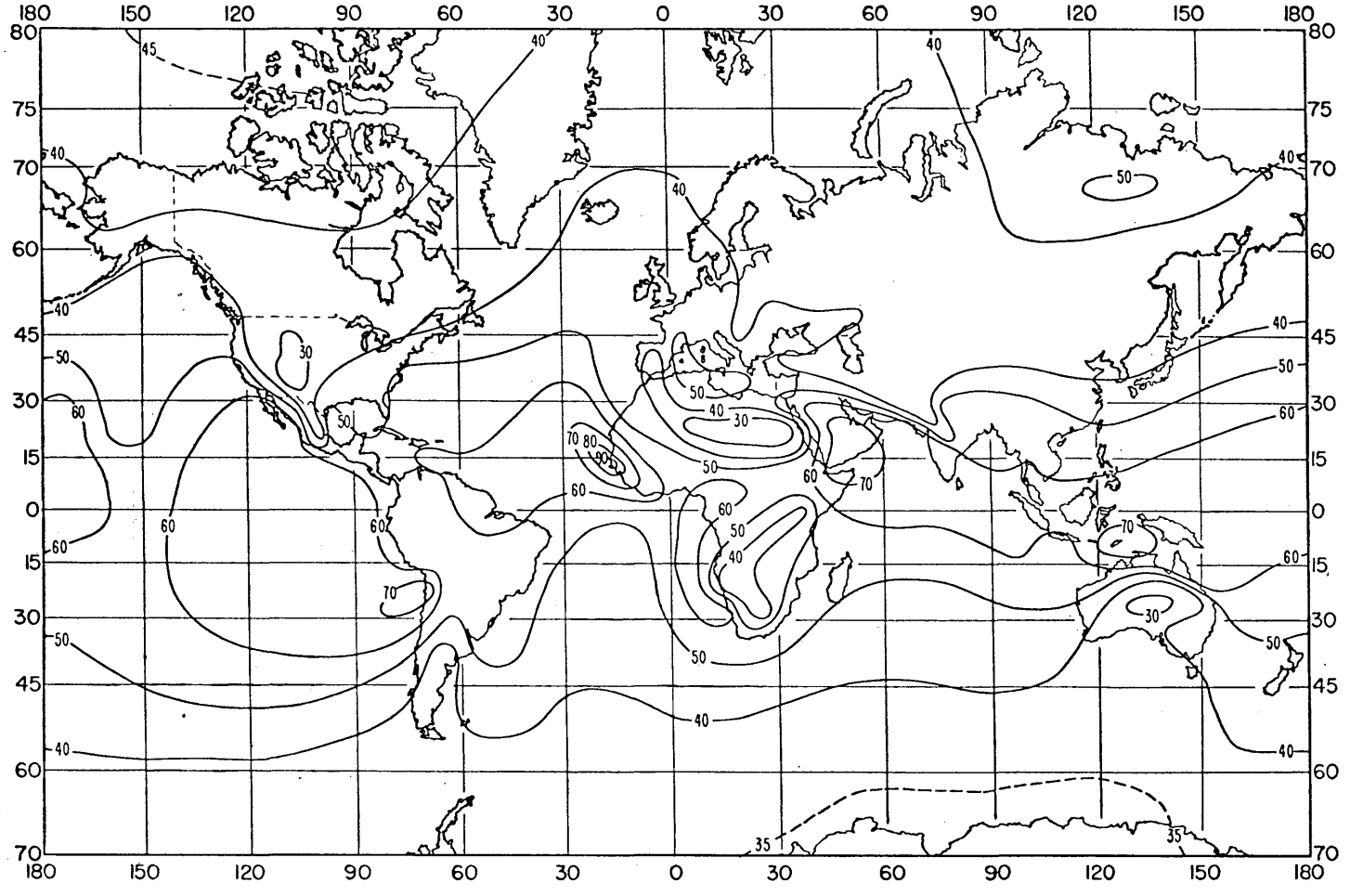
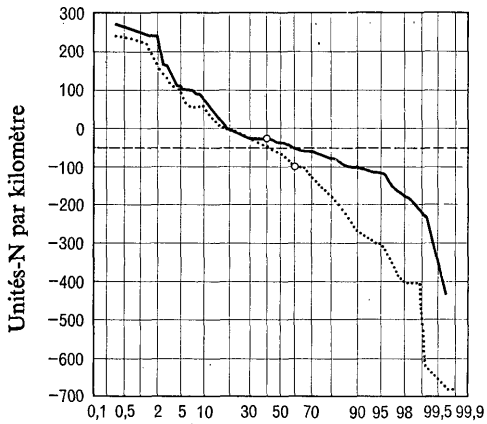


FIGURE 7

Valeurs moyennes mensuelles de ΔN : novembre

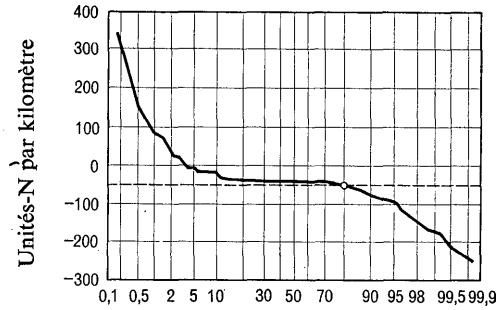


Pourcentage du temps pendant lequel l'ordonnée est dépassée

Nicosie, Chypre.

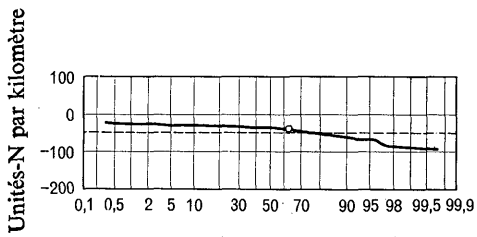
..... 0000 GMT

——— 1200 GMT



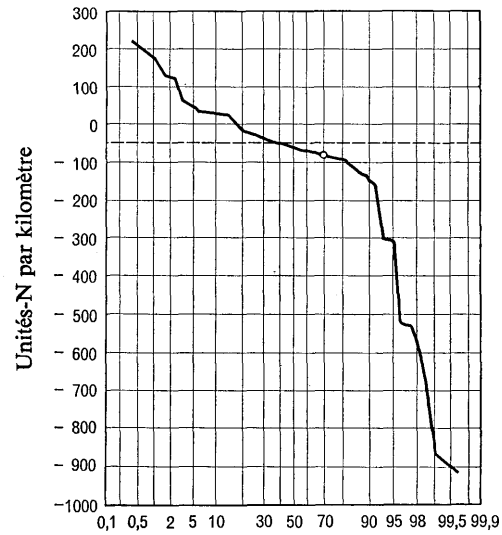
Pourcentage du temps pendant lequel l'ordonnée est dépassée

New York



Pourcentage du temps pendant lequel l'ordonnée est dépassée

Ostersund, Suède



Pourcentage du temps pendant lequel l'ordonnée est dépassée

Bangui, République Centrafricaine

FIGURE 8

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

RAPPORT 234-2 *

INFLUENCE DE LA RÉFRACTION ET DE L'ABSORPTION TROPOSPHÉRIQUES SUR LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE

Propagation Terre-espace

(Question 2-1/5, Programme d'études 5-1C-1/5)

(1963 - 1966 - 1970)

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 une absorption qui peut devenir importante aux fréquences supérieures à environ 1 GHz. Le présent Rapport expose brièvement les principales caractéristiques de l'absorption et de la réfraction atmosphériques, plus spécialement du point de vue des radiocommunications Terre-espace.

2. Réfraction

2.1 *Courbure du rayon dans la troposphère*

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 [1, 2]. Des mesures utilisant un radiomètre observant la position apparente du Soleil ont aussi été décrites [3] et on a fait des observations sur la variabilité de la réfraction en utilisant des techniques de phase [4].

En considérant les mesures du « Weather Bureau » de la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'altitude [5], 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 [8]. Dans les références [6 et 7], on a montré que N_s est un bon paramètre utilisable pour prévoir la réfraction à travers l'atmosphère (voir également le Rapport 233-2). Cependant, quelques doutes ont été exprimés sur la possibilité d'utiliser N_s dans les régions équatoriales [9]. 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 231-2), la correction 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°) [10]. 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

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

de l'atmosphère, sa courbure totale est moindre et les modèles atmosphériques mentionnés plus haut sont toujours utilisables.

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 231-2; aux angles de site supérieurs à 50°, il n'y a pas besoin de faire de correction.

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.

Le problème des effets de la réfraction sur la protection de l'orbite géostationnaire est discuté dans le Rapport 393-1.

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 paraboloïde 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 utilisées 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 [11, 12]. Elle doit en conséquence être utilisée avec prudence, en attendant les résultats d'observations expérimentales plus directes, effectuées dans diverses conditions météorologiques.

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.

3. Affaiblissement

3.1 *Généralités*

Aux fréquences supérieures à environ 3 GHz, l'affaiblissement des ondes radioélectriques et les contributions à la température de bruit du système (voir le § 4) 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 spatiale fonctionnant dans cette gamme de fréquences. L'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques est presque uniquement causé 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 important aux fréquences supérieures à 3 GHz et, selon l'état de la neige, dépasser l'affaiblissement produit par la pluie, pour un taux de précipitation équivalent [13]. 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 [14].

L'affaiblissement du signal peut également provenir d'une défocalisation atmosphérique causée par l'étalement du faisceau d'antenne, en raison de la variation de la réfraction atmosphérique en fonction de l'angle de site [15]. Cet affaiblissement doit être considéré comme négligeable pour tous les angles de site dépassant environ 3°.

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

L'absorption par la vapeur d'eau a une raie de résonance à la fréquence 22,23 GHz et l'absorption par 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.

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:

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

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:

$$A_a = \gamma_{o0}\, r_{eo} + \gamma_{w0} r_{ew} \qquad \text{(dB)}$$

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. 1, établie après l'étude d'un article [16], 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 par mètre cube (approximativement égale à un rapport de mélange de 7,6 g/kg).

La Fig. 2 indique la valeur théorique de l'affaiblissement dans un seul sens pour des trajets verticaux ou horizontaux passant par l'atmosphère, dans la gamme de fréquences allant de 1 à 160 GHz et pour un climat modérément humide (7,5 g/m^3 à la surface de la Terre). Elle indique, de plus, les limites correspondant à des taux d'humidité relative de 0% et de 100% pour un trajet vertical à travers l'atmosphère.

La Fig. 3 indique les valeurs de l'affaiblissement total à 4, 11 et 18 GHz dû à l'oxygène, à la vapeur d'eau et à la défocalisation atmosphérique, non dépassé pendant 20% et 0,01% du mois le moins humide de l'année, en fonction de l'angle de site [15].

3.3 *Affaiblissement dû aux précipitations*

L'affaiblissement dû à la pluie excède en général 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 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 γ_r (r) le long du trajet direct entre deux antennes en visibilité mutuelle:

$$A_r = \int_0^{r_0} \gamma_r(r)\mathrm{d}r \qquad \text{(dB)}$$

On a effectué différentes études théoriques [14, 17, 18] 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 [19]. On a trouvé [20] que les résultats de ces études peuvent être résumés, avec une bonne approximation, par l'expression empirique suivante:

$$\gamma_r = K\, R^{\alpha} \qquad \text{(dB/km)}$$

où R représente le taux de précipitation en mm/h. Cette relation est illustrée par la Fig. 4 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 [14].

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 [17, 21].

Il convient d'utiliser la Fig. 4 avec précaution car les affaiblissements mesurés sur certaines fréquences (entre environ 20 GHz et 35 GHz) tendent à dépasser les valeurs maximales prévues [17]. Une difficulté supplémentaire dans l'emploi de la Fig. 4 tient au fait que le taux des précipitations sur les trajets de transmissions réels n'est pas uniforme. 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 [22], 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 [23].

On a peu étudié expérimentalement jusqu'ici le cas des fréquences supérieures à 50 GHz. Les travaux les plus récents dans ce domaine [13, 24] conduisent cependant à penser que, sauf pour des taux de précipitation peu importants, les affaiblissements observés sont inférieurs à ceux que laissent prévoir les considérations théoriques. Il est cependant souhaitable de poursuivre les mesures faites sur des fréquences supérieures à 50 GHz.

A quelques exceptions près [25, 26, 27], les mesures expérimentales de l'affaiblissement dû à la pluie ont été effectuées sur des trajets terrestres à visibilité optique. On a besoin de plus de renseignements sur cet affaiblissement le long de trajets à angle de site élevé pour lesquels la distribution des dimensions des gouttes et les vitesses de chute sont particulièrement incertaines. A cette fin, on peut utiliser comme sources soit le Soleil, soit des radiophares montés à bord d'aéronefs ou de satellites. Il apparaît désirable, afin de pouvoir extrapoler ces mesures pour des régions dans lesquelles il existe des radars météorologiques, d'établir une corrélation

entre ces mesures et des données de diffusion vers l'arrière fournies simultanément par des radars météorologiques fonctionnant sur des fréquences sur lesquelles l'affaiblissement peut être considéré comme négligeable. Les données statistiques seraient particulièrement utiles pour la réalisation de systèmes de télécommunication spatiale (voir par exemple le Rapport 338-1).

Les évaluations de l'affaiblissement à 30 GHz, sur un trajet en direction du zénith, effectuées dans le New Jersey (Etats-Unis) et fondées sur des observations faites pendant une période de cinq mois au sujet du bruit thermique engendré par la pluie à 6 GHz, montrent que l'affaiblissement peut excéder 6 dB à 30 GHz pendant 0,1 % du temps et 36 dB pendant 0,01 % du temps [28].

D'autres études ont été menées dans la région centrale de la partie européenne de l'U.R.S.S. [29]. 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°.

Au Japon, on a directement mesuré l'affaiblissement sur des trajets Terre-espace [27] pour les fréquences 9,4, 11,8 et 17,0 GHz, en utilisant des radiomètres solaires. On a trouvé que, pendant une période d'une année, l'affaiblissement dépassait respectivement 4,5 dB, 7 dB et 14 dB pour les trois fréquences précitées pendant 0,01 % du temps, tous les résultats des mesures étant ramenés à un angle de site de 45°. En examinant les données recueillies pendant quatre ans sur la fréquence 9,4 GHz, on a constaté que, d'une année à l'autre, les résultats statistiques portant sur des pourcentages de temps inférieurs à environ 0,1 % présentaient des variations considérables. Ce fait est dû à ce que les valeurs statistiques relatives à de faibles pourcentages de temps dépendent de l'occurrence d'un petit nombre d'orages violents, ce qui est le cas dans de nombreuses régions du globe.

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 [30].

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 [28]. 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 *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 [14]. Ainsi, l'absorption à l'intérieur de tels nuages ou brouillards peut être donnée par:

$$A_c = K_l M \qquad \text{(dB/km)}$$

où A_c est le coefficient d'absorption dans le nuage, K_l un coefficient d'affaiblissement (en dB/km $(g/m^3)^{-1}$) et M le contenu d'eau liquide du nuage (en grammes par mètre cube).

Les valeurs de K_l sont indiquées à la Fig. 5 [31] pour la gamme de fréquences 10-50 GHz et pour des températures variant de −8°C à +20°C. Etant donné les propriétés diélectriques différentes de l'eau et de la glace, les nuages constitués de particules de glace produisent des affaiblissements environ 100 fois moins élevés que les nuages composés de gouttelettes d'eau. Il n'en sera en conséquence plus tenu compte dans la suite du présent Rapport.

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

4.1 *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 la distance zénithale Φ est donnée par l'expression:

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

lorsque la distance zénithale est inférieure 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.

4.2 *Température de bruit du ciel due aux gaz atmosphériques*

La Fig. 6 indique la température de bruit du ciel due à l'oxygène et à la vapeur d'eau, pour divers angles de site et pour des fréquences comprises entre 1 et 100 GHz [32].

On trouvera dans un article publié [33] des considérations plus détaillées sur les bruits d'origine naturelle se produisant dans la gamme 1-10 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.

4.3 *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. [29] 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.

BIBLIOGRAPHIE

1. FANNIN, B.M. et JEHN, K.H. A study of radar elevation-angle errors due to atmospheric refraction. *Trans. IRE*, AP-5, 71 (1957).
2. ANDERSON, W.L., BEYERS, N.J. et RAINEY, R.J. Comparison of experimental and computed refraction. *Trans. IRE*, AP-8, 456-461 (1960).
3. ANWAY, A.C. Empirical determination of total atmospheric refraction at centimeter wavelengths by radiometric means. Collins Research Report No. CRR-2425, Collins Radio Company, Cedar Rapids, Iowa (juin 1961).
4. 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 KIRKPATRIK, A.W. An experimental study of phase variations in line-of-sight microwave transmissions. NBS Monograph No. 33 (novembre 1961).
5. SCHULKIN, M. Average radio ray refraction in the lower atmosphere. *Proc. IRE*, Vol. 40, **5**, 554-561 (mai 1952).
6. BEAN, B.R., THAYER, G.D. et CAHOON, B.A. Methods of predicting the atmospheric bending of radio rays. *NBS Journal of Research*, **64D**, 5 (1960).
7. BEAN, B.R. et THAYER, G.D. Comparison of observed atmospheric radio refraction effects with values predicted through the use of surface weather observations. *NBS Journal of Research*, **67D**, 3 (1963).
8. C.C.I.R. Doc. V/27 (Royaume-Uni), 1966-1969.
9. MISME, P., BEAN, B.R. et THAYER, G.D. Models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, **48**, 8, 1499-1501 (août 1960).
10. BEAN, B.R. et DUTTON, E.J. Radio Meteorology. NBS Monograph No. 92, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1966).
11. C.C.I.R. Doc. V/108 (Royaume-Uni), 1966-1969.
12. LANE, J.A. 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 (1968).
13. MISME, P. Etude expérimentale de la propagation des ondes millimétriques dans les bandes des 5 et des 3 mm. *Annales des télécommunications* (novembre-décembre 1966).
14. RYDE, J.W. et RYDE, D. Attenuation of centimetre waves by rain, hail, fog and clouds. General Electric Co., Wembley, England (1945).
15. C.C.I.R. Doc. V/112 (Royaume-Uni), 1966-1969.
16. RICE, P.L., LONGLEY, A.G., NORTON, K.A. et BARSIS, A.P. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits. NBS Technical Note 101 (Rev.) (1966).
17. MEDHURST, R.C. Rainfall attenuation of centimeter waves: Comparison of theory and measurement. *Trans. IEEE*, AP-13, **4**, 550-564 (1965).
18. OGUCHI, T. Attenuation of electromagnetic waves due to rain with distorted raindrops. *J. Radio Res. Labs* (Tokyo), Vol. 11, 19-37 (janvier 1964).
19. LAWS, J.O. et PARSONS, D.A. The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 24, 452-460 (1943).
20. GUNN, K.L.S. et EAST, T.W.R. The microwave properties of precipitation particles. *Quar. J. Roy. Meteorological Soc.* London, **80**, 522-545 (1954).
21. BLEVIS, B.C., DOHOO, R.M. et MCCORMICK, K.S. Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. *Trans. IEEE*, AP-15, 394-403 (1967).
22. C.C.I.R. Doc. V/18 (Japon), 1966-1969.
23. BUSSEY, H.E. Microwave attenuation statistics estimated from rainfall and water vapor statistics. *Proc. IRE*, **38**, 781-785 (juillet 1950).
24. LANE, J.A., GORDON-SMITH, A.C. et ZAVODY, A.M. Absorption and scintillation effects at 3 mm wavelength on a short line-of-sight radio link. *Elect. Letters*, **3**, 185 (1967).

25. C.C.I.R. Doc. V/29 (Canada), 1966-1969.
26. WULFSBERG, K.N. Atmospheric attenuation at millimeter wavelengths. *Radio Science*, Vol. 2, **3**, 319-324 (1967).
27. C.C.I.R. Doc. V/126 (Japon), 1966-1969.
28. HOGG, D.C. Millimeter-wave communication through the atmosphere. *Science*, Vol. 159, 39-45 (5 janvier 1968).
29. C.C.I.R. Doc. IV/332 (U.R.S.S.), 1966-1969.
30. C.C.I.R. Doc. IV/340 (Inde), 1966-1969.
31. SNIDER, J.B. A proposed program for the study of atmospheric attenuation of satellite signals. ESSA Technical Report RL 62-WPL 1 (janvier 1968).
32. HOGG, D.C. et SEMPLAK, R.A. The effect of rain and water vapor on sky noise at centimeter wavelengths. *B.S.T.J.*, 40, **5**, 1331-1348 (septembre 1961).
33. CROOM, D.L. Naturally-occurring thermal radiation in the range 1-10 GHz. *Proc. I.E.E.*, 111-113, 967 (1964).

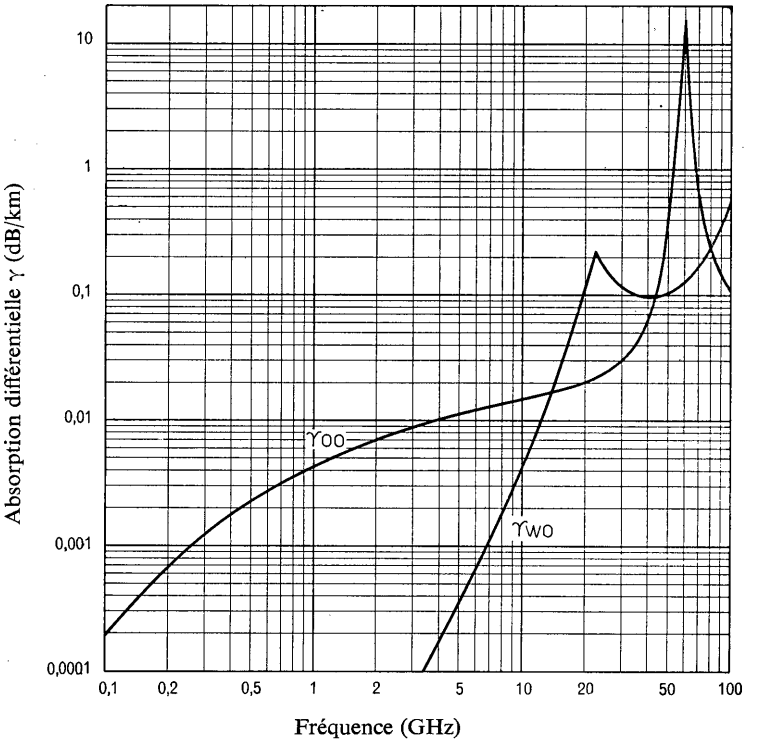


FIGURE 1

Valeurs γ_{o0} et γ_{w0} 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

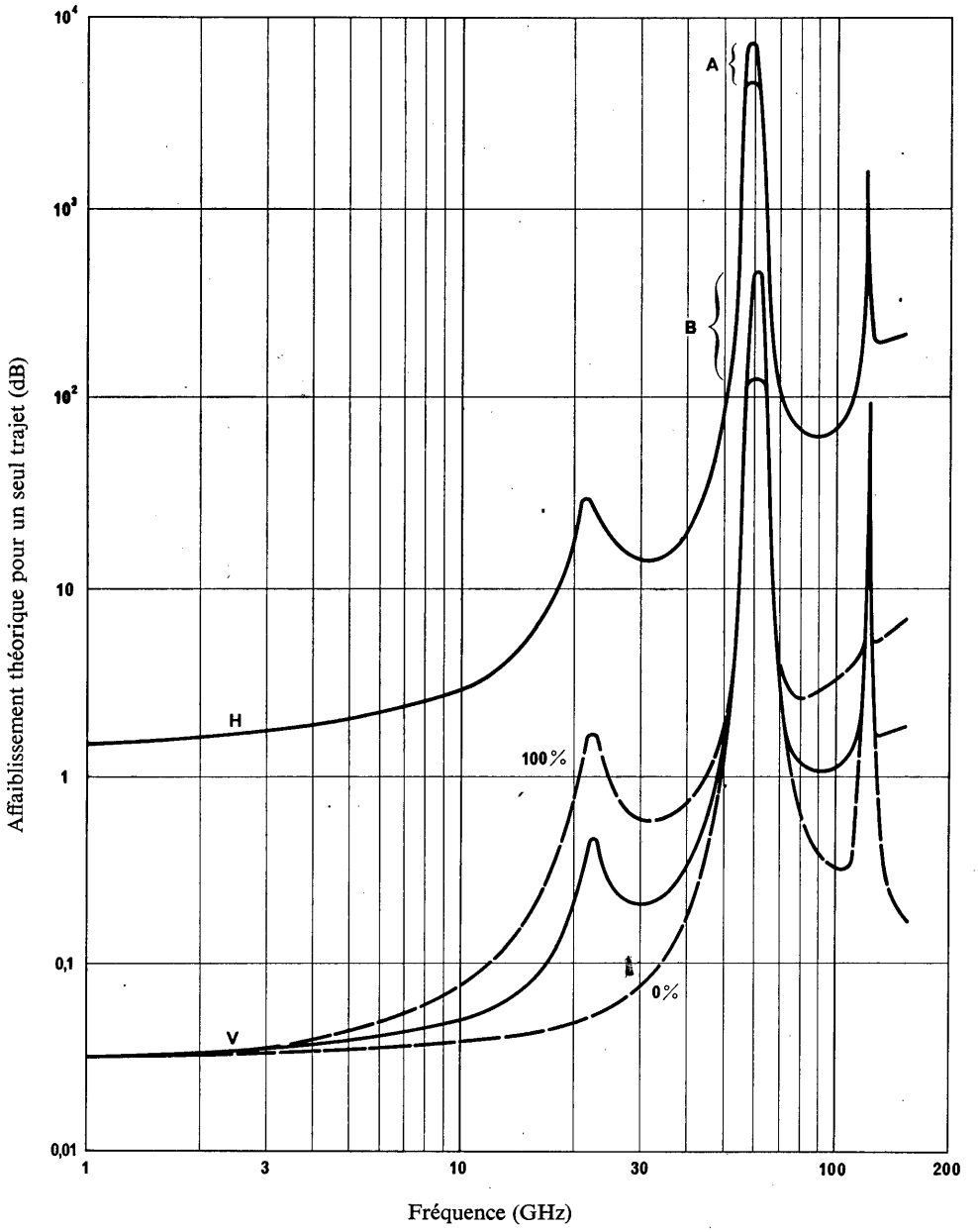


FIGURE 2

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

A: Domaine d'incertitude H: Horizontal

B: Domaine d'incertitude V: Vertical

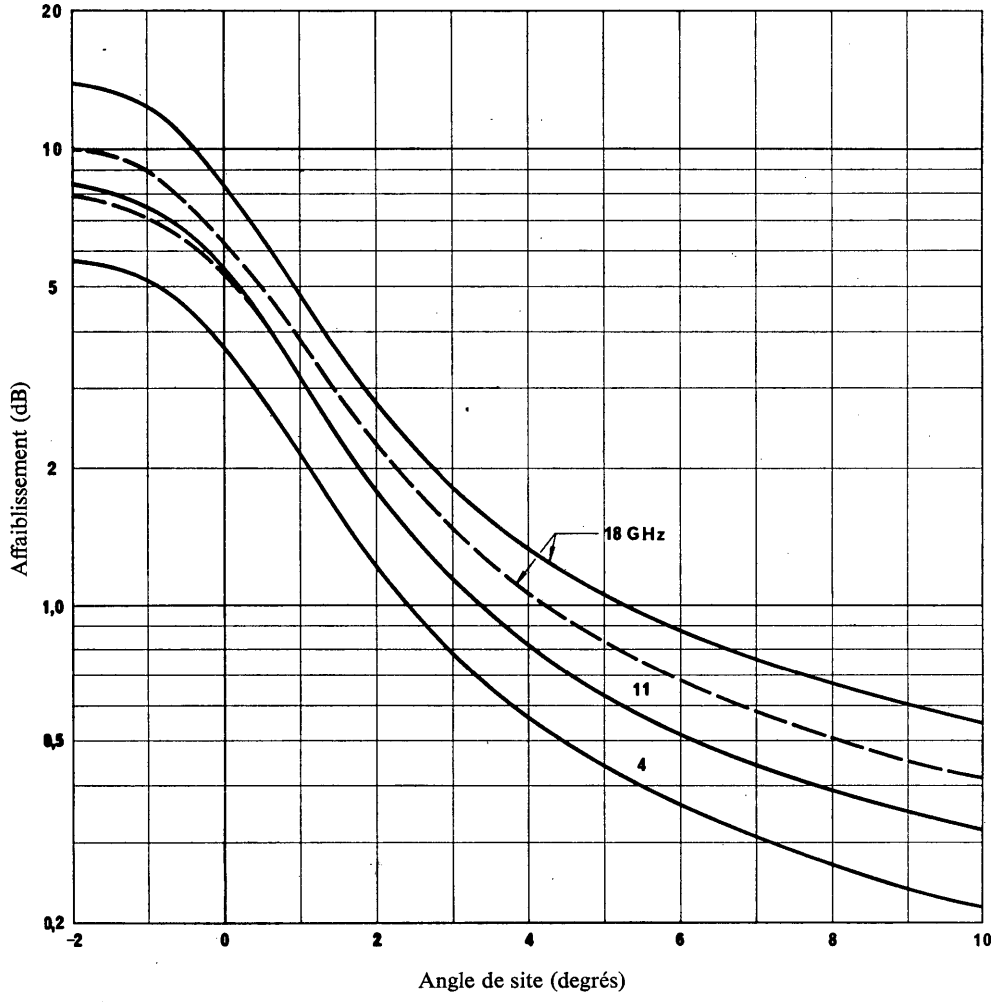


FIGURE 3

Valeurs 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

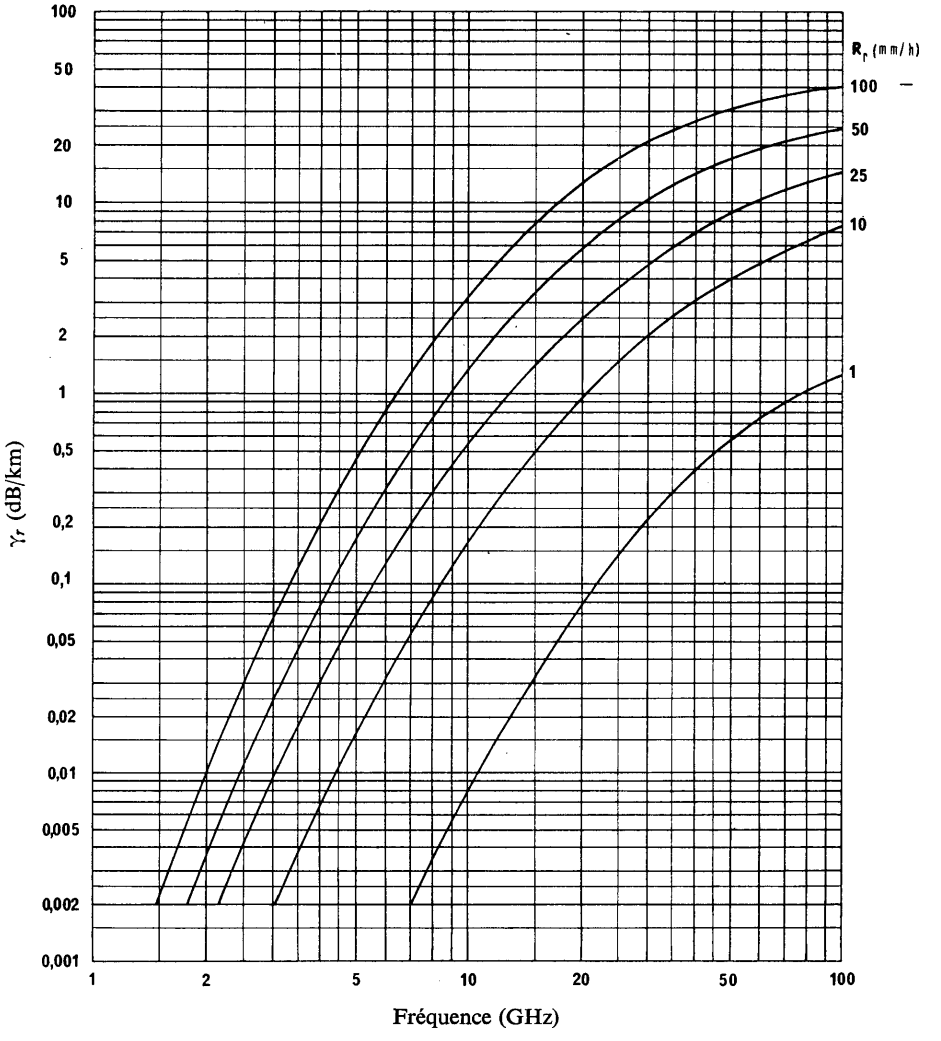


FIGURE 4

Variation de γ_r avec la fréquence

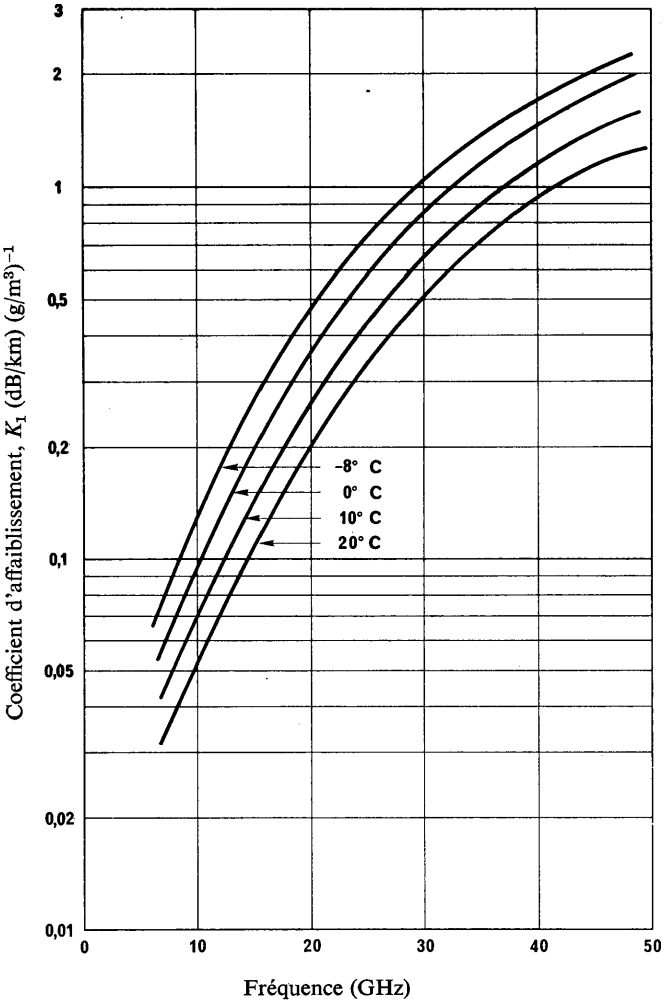


FIGURE 5

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

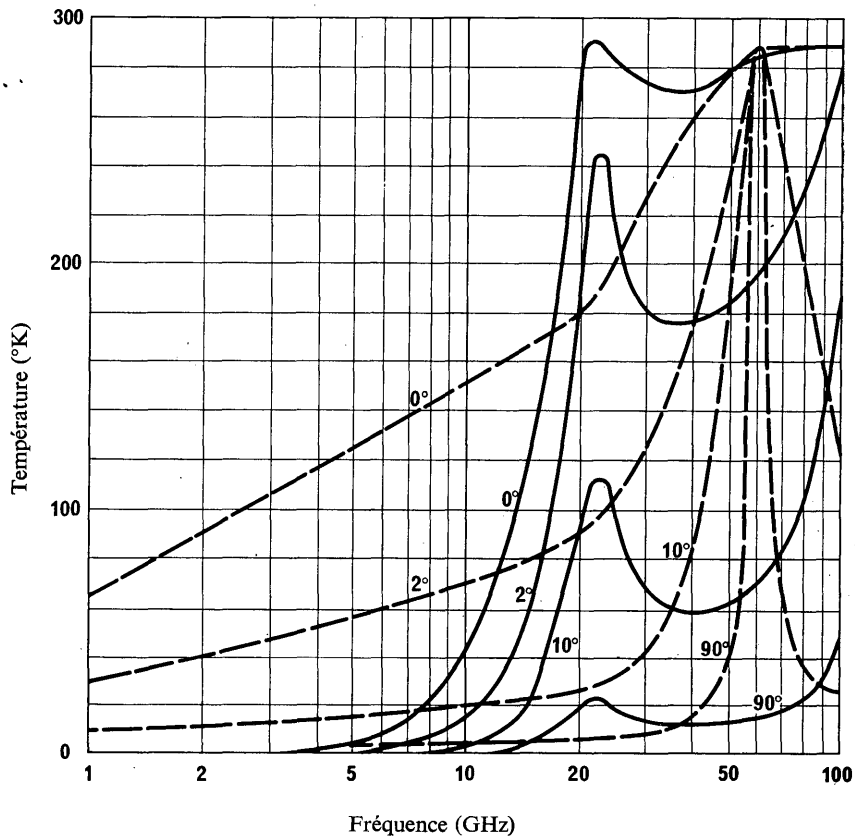


FIGURE 6

Température de bruit du ciel due à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau
(Angle de site: indiqué sur la courbe)

Pression au sol: 760 mm Hg

Température au sol: 20°C

Densité de la vapeur d'eau: 10 g/m³

——— Vapeur d'eau

— — — — Oxygène

RAPPORT 339-1 *

INFLUENCE DE LA DIFFUSION PAR LES PRÉCIPITATIONS SUR LE CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES STATIONS TERRESTRES

(Programme d'études 5-1D-1/5)

(1966 - 1970)

1. Introduction

On a montré [1, 2] que la diffusion par les précipitations peut être un facteur important dans la détermination des probabilités de brouillage entre une station terrienne et une station de faisceaux hertziens qui travaillent dans la même bande de fréquences. Etant donné le besoin d'estimer la probabilité de brouillage, ce Rapport a été préparé pour donner des informations sur la distribution temporelle de la grandeur de la diffusion par la pluie avec une référence particulière aux conditions dans lesquelles ce facteur est probablement prédominant dans la détermination de la valeur du champ de brouillage dépassé pendant un faible pourcentage de temps.

Les effets de brouillage appartiennent à deux types principaux. Le premier est le brouillage à grande distance apparaissant à des espacements de centaines de kilomètres quand le volume commun intercepté par les deux antennes est dans une zone de diffusion orageuse. Le second peut apparaître à des espacements de moins de 100 km au cours de fortes précipitations — une altitude quelconque — en prenant naissance dans le lobe principal d'une antenne et les lobes latéraux de l'autre.

Dans le présent Rapport, on a indiqué, après avoir tenu compte des aspects géométriques et météorologiques du problème, les résultats obtenus aussi bien dans le cas où les faisceaux d'antennes à 6 GHz se coupent que dans celui où ils ne se coupent pas, en fonction du taux de précipitation. Pour les fréquences 12 et 18 GHz, et dans le cas où les faisceaux d'antennes se coupent, on a présenté des estimations correspondant aux cas extrêmes, à savoir affaiblissement dans l'ensemble de l'atmosphère ou seulement dans le volume commun aux deux faisceaux.

Il convient de noter que la diffusion due à des hétérogénéités de l'indice de réfraction peut se produire également au point d'intersection de faisceaux orientés le long de l'arc de grand cercle ou formant un angle de quelques degrés avec celui-ci. Toutefois, si on utilise les valeurs de réflectivité mesurées [8], on constate que dans un cas typique (Doc. V/109 (Royaume-Uni), 1966-1969), l'affaiblissement à 4 GHz dépassé pendant 99% du temps est comparable à celui qui se produit lors d'une propagation transhorizon normale et qu'il est sensiblement inférieur à celui auquel on peut s'attendre lors de la diffusion par les précipitations, sauf peut-être dans les climats secs.

2. Cas où les faisceaux se coupent

La méthode utilisée suppose que l'affaiblissement de transmission (égal à 10 log P_t/P_r) associé à la diffusion par la pluie entre deux points de la surface terrestre peut être calculé à partir de l'équation générale:

$$P_r/P_t = \int (G_{ts}/4\pi d^2_{ts})\,(\eta/4\pi d^2_{es})\,(G_{es}\lambda^2/4\pi)\,\mathrm{d}v \qquad (1)$$

où P_r et P_t désignent respectivement la puissance reçue et la puissance émise,

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

G_{ts} et G_{es} sont respectivement les gains de l'antenne de la station de Terre et de l'antenne de la station terrienne,

d_{ts} et d_{es} les distances respectives de la station de Terre et de la station terrienne à la région de diffusion,

dv un élément du volume de diffusion,

λ la longueur d'onde,

η la section droite de diffusion par unité de volume.

Sauf indication contraire, on a utilisé le mètre comme unité de longueur dans tous les calculs.

La station terrienne est supposée avoir une antenne bien plus grande que celle de la station de Terre, et dont le faisceau a un angle d'élévation d'au moins 3° au-dessus de l'horizon. Les résultats donnés dans ce Rapport ont été obtenus à partir du calcul du volume commun aux deux ouvertures d'antennes à 3 dB et pour des valeurs de η obtenues par des sondages au radar. On suppose une diffusion de Rayleigh ou par dipôle et qui est uniforme dans le plan horizontal en cas de polarisation verticale et on n'a pas tenu compte de la diffusion par la pluie dans les lobes latéraux des antennes.

Comme $\eta \approx Z/3{,}6 \times 10^{15}\lambda^4$ par mètre, où Z est le facteur de réflectivité (en mm^6/m^3) dans tout le volume commun, avec:

$$G_{ts} b^2 = \pi^2 \quad \text{et}$$

$$\int dv = (\pi/4)\,(b_{es}\, d_{es})^2\, d_{ts}\, b_{ts}/\sin\theta$$

où b est la largeur du faisceau d'antenne en radians, il vient:

$$P_r/P_t \simeq \frac{Z\sqrt{G_{ts}}}{3\, d_{ts}\, \lambda^2 \sin\theta \times 10^{17}} \tag{2}$$

θ étant l'angle que font les faisceaux des antennes.

3. Cas où les faisceaux ne se coupent pas

Le problème de l'intégration de (1) mène à la question [3] de l'intégration le long des deux faisceaux lorsque les gains sont maximaux. En remplaçant η par $Z/3{,}6 \times 10^{15}\lambda^4$ et dv par $(\pi/4)\, b_{es}^2\, d_{es}^2\, ds$ etc., on obtient:

$$10^{18}\, \lambda^2\, (P_r/P_t) = \int_{es} \left(\frac{G_{ts}\, Z_{es}}{d_{ts}^2}\right) ds + \int_{ts} \left(\frac{G_{es}\, Z_{ts}}{d_{es}^2}\right) ds' \tag{3}$$

On fait alors les hypothèses suivantes (Doc. V/145, (Etats-Unis d'Amérique), 1966-1969):

— les deux faisceaux sont proches l'un de l'autre, c'est-à-dire que la longueur y de leur perpendiculaire commune n'est que de quelques kilomètres;

— la valeur de Z est constante dans la partie de chaque faisceau proche du pied de la perpendiculaire; sinon, on peut calculer et utiliser des valeurs équivalentes;

— $G_{ts} = 0{,}3/\alpha_{ts}^2$ ou $\log 10\, G_{ts} = 30 - 20 \log \alpha^\circ_{ts}$
quoiqu'un exposant plus élevé puisse mieux convenir dans le cas d'une antenne en cornet;

— $G_{es} = 0{,}3/\alpha_{es}^2$ ou $\log 10\, G_{es} = 30 - 20 \log \alpha^\circ_{es}$.

Si les précipitations couvrent une grande étendue ou si elles peuvent être considérées comme symétriques par rapport à la perpendiculaire, c'est-à-dire que l'angle de site du faisceau de la station terrienne est inférieur à environ 30°,

$$10^{19}\,\lambda^2\,(P_r/P_t)\,\sin\theta = (6\,Z_{es}/y + 6\,Z_{ts}/y)\,\text{arc tg}\,(x/y) \qquad (4)$$

Du fait que arc tg $\infty = \pi/2$ et que arc tg $1 = \pi/4$, on voit que, dans une atmosphère uniforme, une moitié des brouillages dus à un faisceau donné provient d'une région située à $\pm\,(y/\sin\theta)$ du pied de la perpendiculaire. Si les précipitations n'ont lieu que dans une étendue restreinte, de diamètre équivalent $D \leq 2y/\sin\theta$, x est alors égal à $(D\sin\theta/2)$ et arc tg $(x/y) \approx (\pi D\sin\theta)/8y$, et l'on peut écrire:

$$P_r/P_t = (Z_{es} + Z_{ts})\,D/(4 \times 10^{18}\,\lambda^2\,y^2) \qquad (5)$$

étant entendu que, dans le cas de précipitations étendues, D doit avoir une valeur égale à $4\,y/\sin\theta$.

4. Facteur de réflectivité d'une précipitation continue

Les météorologues distinguent deux types principaux de précipitations. Le plus simple est appelé *précipitation continue* — de pluie ou de neige — à partir d'une formation nuageuse stratifiée qui s'étend uniformément sur une vaste zone et à une hauteur relativement limitée. Atlas [4] donne pour une pluie d'été stratifiée des courbes types qui peuvent s'exprimer approximativement comme suit:

$$\log Z = \log Z_0 - 5 \times 10^{-8}.H^2 \qquad (6)$$

où Z_0 = facteur de réflectivité au sol, que l'on considère généralement comme lié au taux de précipitation au sol R exprimé en mm/h [4] par la relation:

$$Z_0 = 200\,R^{1{,}6}\ (\text{mm}^6/\text{m}^3) \qquad (7)$$

A titre d'exemple, pour la région de Washington, Bussey [5] a montré qu'il y a une heure environ par an où le taux atteint ou dépasse 25 mm/h ($Z_0 = 3{,}4 \times 10^4$ pour 0,14 % d'un mois) et que, pour certaines régions du sud-est des Etats-Unis d'Amérique, pendant cinq minutes environ tous les deux ans le taux est de 150 mm/h ($Z_0 = 6 \times 10^5$ pendant 0,01 % d'un mois). On trouvera dans [4] à la Fig. 5.5, à titre d'indication de ce qui est possible, un taux de précipitation pluviale de 300 mm en 40 minutes, relevé à Holt (Missouri) le 22 juin 1947 et correspondant à un taux de 450 mm/h pendant 0,1 % environ d'un mois.

De l'équation (4), on déduit:

$$\int_0^\infty Z\,\mathrm{d}s = \int_0^\infty Z\,\mathrm{d}H/\sin E_{es} = 2620\,Z_0/\sin E_{es} \qquad (8)$$

de telle sorte qu'on peut considérer le faisceau d'antenne de la station terrienne comme traversant une précipitation uniforme telle que mesurée au sol ($Z = Z_0$) jusqu'à une altitude de 2,6 km. Le faisceau d'antenne de la station de Terre est à peu près horizontal au voisinage de la station terrienne à une altitude facile à calculer, mais généralement suffisamment basse pour que, au sol, on puisse utiliser Z_0.

5. Facteur de réflectivité d'une précipitation de convection

Un type de précipitation plus complexe est appelé précipitation de convection ou averse. Cette précipitation n'est pas uniforme dans le temps et dans l'espace contrairement aux précipitations continues, mais varie rapidement sur de petites zones par suite de son origine turbulente. Si la formation atteint une altitude de huit à neuf kilomètres, elle se transforme

normalement en un orage, avec de forts courants ascendants qui soulèvent plusieurs fois les particules à de grandes hauteurs, souvent sous la forme de grêle. Les particules les plus grosses se rencontrent donc dans des tranches d'espace libre à plusieurs centaines de kilomètres des stations terriennes et de Terre. On a mis au point un modèle d'orage [7], qui considère les courbes de Z comme disposées en enveloppes cylindriques coaxiales (incorrectement qualifiées de sphériques dans le document [8]) plus facilement accessible d'après la formule

$$Z = 3{,}8 \times 10^{-6} \cdot (r_0 - r)^{2,5} \tag{9}$$

où r_0 est le rayon (m) correspondant à la réflectivité la plus petite qui soit décelable. Les valeurs maximales de r_0 et de la moitié de l'altitude sont souvent de 8000 m environ [9].

Si le faisceau de la station terrienne, pour un angle de site E_{es}, coupe l'axe de l'orage, on peut montrer que:

$$\begin{aligned} DZ = \int_{-r_0}^{+r_0} Z \, ds &= 1{,}2 \times 10^{-5} r_0^{3,5}/\cos E_{es} \; (E_{es} < 45°) \\ &= 5{,}7 \times 10^{8}/\cos E_{es} \; (r_0 = 8000 \text{ m}) \\ &= 6{,}6 \times 10^{8} \; (E_{es} = 30°) \end{aligned} \tag{10}$$

Donaldson [10] a publié des courbes de réflectivité correspondant à 130 orages observés au radar pendant deux années dans la région de Boston. Sur cette base, on peut montrer qu'un orage occasionnel peut avoir sa valeur maximale de Z à 9 km, bien qu'une valeur maximale à 6 km (de 3×10^6 mm^6/m^3) soit plus probable. Pour les orages, un maximum approximatif de DZ égal à 10^{10} mm^6/m^2 semble raisonnable.

6. Facteurs de réflectivité d'une précipitation composite

Pour trouver une solution statistique simple de ce problème, il faut faire l'hypothèse que la répartition du facteur de réflectivité des précipitations est définie sur la base d'un échantillonnage uniforme dans le temps et dans l'espace. On a publié un grand nombre de courbes intéressantes pour la répartition verticale, mais les seuls résultats obtenus sur la base d'un échantillonnage régulier et complet, à plusieurs altitudes, et sur une surface horizontale très étendue, sont ceux obtenus à Montréal (Canada) pendant cinq mois de l'été de 1963 pendant lesquels s'étaient produits la plupart des orages de l'année [6]. Ces données ont permis par exemple de déterminer que le facteur de réflectivité Z (à une hauteur quelconque), qui était dépassé pendant 0,01 % au maximum des cinq mois, pouvait être exprimé en première approximation par:

$$\begin{aligned} h &= -4{,}15 \log Z + 22{,}7 && 0 < h < 6 \text{ km} \\ h &= -2{,}14 \log Z + 14{,}6 && 6 \text{ km} < h < 21 \text{ km} \\ Z &= 0 && 21 \text{ km} < h \end{aligned}$$

Ces résultats ont été obtenus avec un radar de 3 cm, mais ils ont été corrigés pour tenir compte de l'affaiblissement. Une étude des variations mensuelles permet de conclure que la représentation ci-dessus est valable pour 0,02 % du mois le plus défavorable, c'est-à-dire juillet.

On notera tout particulièrement que les données sur les précipitations de surface peuvent fournir des indications utiles sur la réflectivité de l'atmosphère, seulement lorsque les précipitations sont essentiellement continues ou lorsqu'on considère les moyennes à long terme. Dans les mois orageux, les données en question peuvent conduire à des résultats tout à fait erronés.

7. Résultats

7.1 *Cas où les faisceaux se coupent*

La probabilité de brouillage par un signal non désiré est la probabilité pour que le rapport signal désiré/signal non désiré soit inférieur à une certaine valeur minimale admissible pendant un pourcentage de temps donné. La probabilité de brouillage à 6 GHz (pour 0,02% du mois le plus défavorable) peut se déterminer d'après la Fig. 1. En employant les notations du § 6, on l'obtient comme suit. Soit une station terrienne *ES* équipée d'une antenne de 26 m de diamètre qui est pointée selon des angles de site fixes, E_{es}, de 3°, 30° respectivement. On suppose qu'à l'origine le faisceau de cette antenne est dirigé vers la droite, comme le montre la figure. D'autre part, on suppose que la station de Terre, dont l'antenne de 1,8 m de diamètre est pointée selon un angle de site $E_{ts} = 0°$, est située en des points du plan où les azimuts sont tels que l'axe du faisceau coupe celui du faisceau de la station terrienne. On trace le lieu des positions de la station de Terre pour lesquelles on a des valeurs constantes du rapport P_t/P_r. Supposons par exemple que -115 dBW soit la valeur maximale admissible du niveau du signal non désiré à l'entrée du récepteur « de Terre », et que 10 kW (40 dBW) soit la puissance de l'émetteur de la station terrienne; cela étant, la courbe marquée 155 dB (affaiblissement de transmission) indique la région en dehors de laquelle une antenne de faisceau hertzien ne recevra pas de brouillages nuisibles pendant plus de 0,02% environ du mois le plus défavorable. Il est bien entendu que l'affaiblissement de transmission indiqué plus haut englobe environ 100 dB pour les gains d'antenne, ce qui correspond aux dimensions d'antenne spécifiées ci-dessus.

Les emplacements des stations et des orages étant donnés, on peut admettre que le rapport P_t/P_r est proportionnel au cube de la longueur d'onde et inversement proportionnel au diamètre de la plus petite antenne. Ce rapport est sensiblement indépendant du diamètre de la grande antenne, voir (2).

Pour généraliser l'application de la Fig. 1, on peut calculer la relation entre le taux de précipitation et la distance indiquée sur la Fig. 2 (Doc. V/113 (Etats-Unis), 1966-1969) en utilisant un profil de réflectivité vertical, analogue à celui qui est décrit au § 6, en convertissant le taux de précipitation au moyen de l'équation (7) de la manière suivante:

$$R(h) = R_0\, 10^{-0{,}025\, h^2}$$

où h est la hauteur en kilomètres.

Pour cette figure, on suppose que $\lambda = 5$ cm, $G_{ts} = 43$ dB et $P_r/P_t = -140$ dB. Pour obtenir la distance de coordination dans des conditions différentes, il ne faut pas utiliser le taux de précipitation réel à la surface R_0 pendant le pourcentage de temps considéré, mais un taux effectif R_e qu'on obtient à l'aide de la formule:

$$R_e = R_0\, (5/\lambda)^{1{,}25}\, 10^{\Delta L_s/16}$$

où λ est exprimé en centimètres et ΔL_s en dB au-dessus de $P_t/P_r = 140$ dB.

On a étudié l'effet de l'affaiblissement en présence de la diffusion sur 12 et 18 GHz (Doc. V/117 et Corr. 1 (Etats-Unis d'Amérique), 1966-1969) en formulant des hypothèses limites de précipitations dans l'ensemble de l'atmosphère ou seulement dans le volume commun des lobes principaux. Les résultats de ces hypothèses sont indiqués sur les Fig. 3 et 4. On notera que, dans le premier cas, la diffusion est plus efficace que l'affaiblissement pour le cas de 1 mm/h.

7.2 *Cas où les faisceaux ne se coupent pas*

Pour des précipitations pluviales continues $\lambda = 5$ cm et θ est voisin de 90°:

$$P_r/P_t = 4 \times 10^{-16}\, (Z_{es} + Z_{ts})/y \qquad (11)$$

En admettant que $Z_{ts} = 200\ R^{1,6}$ et que $Z_{es} = Z_{ts}$ puisque, l'angle de site du faisceau de la station terrienne étant généralement supérieur à celui du faisceau de la station de Terre, Z_{es} ne doit pas dépasser Z_{ts} et ne peut entraîner qu'une modification d'au plus +3 dB,

$$P_r/P_t = 8 \times 10^{-14}\ R^{1,6}/y \qquad (12)$$

En résolvant cette équation par rapport à y, on obtient les valeurs suivantes (à 5 GHz):

TABLEAU I

Rayon critique du cylindre pour une pluie continue (km)

Taux des précipitations R (mm/h)	10 log (P_r/P_t) (dB)			
	−130	−140	−150	−160
2,5				3,5
10			3,2	32
25		1,4	13,6	(1)
100	1,3	12,8	(1)	(1)

(1) Les valeurs calculées sont en excès des conditions admissibles pour une répartition uniforme de la pluie.

Note. — Ces valeurs ne sont applicables que si la distance angulaire minimale des axes des faisceaux, vue du faisceau hertzien est supérieure à 1,5° c'est-à-dire si $y/d \geqq 0{,}026$, d représentant la distance entre les deux antennes, dans les mêmes unités que y. En conséquence, ces valeurs ne s'appliquent pas au voisinage des intersections des faisceaux, dans le cas où les faisceaux se coupent presque.

Pour les précipitations pluviales de type convectif, $\lambda = 5$ cm, θ est voisin de 90° et $Z_{es} = Z_{ts} = Z$. On obtient alors:

$$P_r/P_t = 2 \times 10^{-16}\ DZ/y^2 \qquad (13)$$

En résolvant cette équation par rapport à y, on obtient les valeurs suivantes:

TABLEAU II

Rayon critique du cylindre dans le cas d'averses orageuses (km)

DZ	10 log (P_r/P_t) (dB)			
	−130	−140	−150	−160
10^7		0,45	1,4	4,5
10^8	0,45	1,4	4,5	14,1
10^9	1,4	4,5	14,1	
10^{10}	4,5	14,1		

8. Climatologie par radiodétection

Si l'on veut faire une étude plus approfondie du problème posé, il est évident que l'on doit disposer d'un grand nombre de renseignements détaillés sur la répartition de la réflectivité, obtenus par échantillonnage systématique de données temporelles et de données spatiales dans

les trois dimensions; or, des renseignements de cette nature ont été publiés exclusivement, jusqu'à présent, pour Montréal, au Canada [6]. Pour le reste du globe, on est obligé d'avoir recours à des observations « de surface » et à un petit nombre de renseignements obtenus par radar, et qui représentent le pourcentage de probabilité pour que l'on puisse « voir » un écho entre 10,5 et 12 km, à des hauteurs au plus égales à 160 km.

Il convient de noter que les valeurs à long terme du taux de précipitation en surface présentent une corrélation médiocre avec la réflectivité des orages. Il en est ainsi, non seulement en raison du grand développement vertical et du caractère local du phénomène, mais aussi en raison du fait suivant: le facteur de réflectivité est lié non pas à la quantité de pluie tombée, mais au taux de précipitation, en général par l'expression $Z = 200 \, . \, R^{1,6}$, où R désigne le taux de précipitation en mm/h. La Fig. 2 fait apparaître une corrélation utile avec la répartition des jours d'orage; l'intérêt de cette constatation réside dans le fait que des cartes de ce genre existent pour chaque mois et pour le monde entier [12]. Les études se poursuivent sur la façon dont ces données climatologiques pourraient être exploitées quantitativement.

Bibliographie

1. Doherty, L.H. et Stone, S.A. Forward scatter from rain. *Trans. IRE, AP-8* (juillet 1960).
2. Dennis, A.S. Precipitation scatter as an interference source in communication systems. *IRE Convention Record*, Part 1, Antennas and Propagation, 145 (1962).
3. Altman, F.J. Precipitation scatter interference in the 4 and 6 GHz bands. *Proc. of 1968 IEEE International Communications Convention.* Présenté à IEEE Trans. of Com. Tech. Group (1968).
4. Atlas, D. Model atmospheres for precipitation. *Handbook of Geophysics and space environments.* Sec., 5.2, 5-6 (1965).
5. Bussey, H.E. Microwave attenuation estimated from rainfall and water vapor statistics. *Proc. IRE*, **38**, 781 (1950).
6. Marshall, J.S., Holtz, C.D. et Weiss, M. Distribution of rain shower intensity as a function of height. *XIIth Conf. on Radar Met., Norman, Oklahoma*, 473-478 (octobre 1966).
7. Dennis, A.S. Rainfall determinations by meteorological satellite radar. *Stanford Research Institute, Project No. 4080* (avril 1963).
8. Dutton, E.J. Estimation of radio ray attenuation in convective rainfalls. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, **4**, 662-668 (août 1967).
9. Byers, H.R. et Braham, R.R., Jr. *The thunderstorm.* U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1949).
10. Donaldson, R. J., Jr. Radar reflectivity profiles in thunderstorms. *Jour. of Met.*, 18, 3, 292-305 (juin 1961).
11. Grantham, D.D. et Kantor, A.J. Horizontal and vertical distributions of radar echoes. *XIIth Conference on radar meteorology. Norman, Oklahoma*, 500-505 (octobre 1966).
12. O.M.M. World distribution of thunderstorm days. *WMO/OMM — No. 21* — T. P. 21.

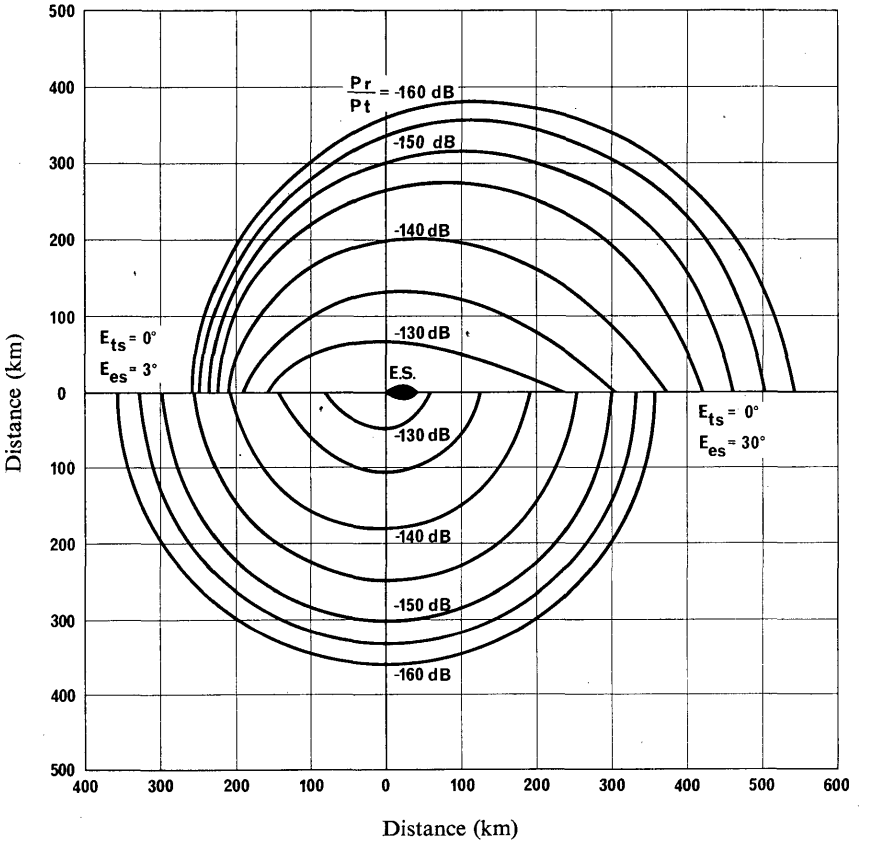


FIGURE 1

Courbes d'égale valeur d'affaiblissement pour des faisceaux qui se coupent

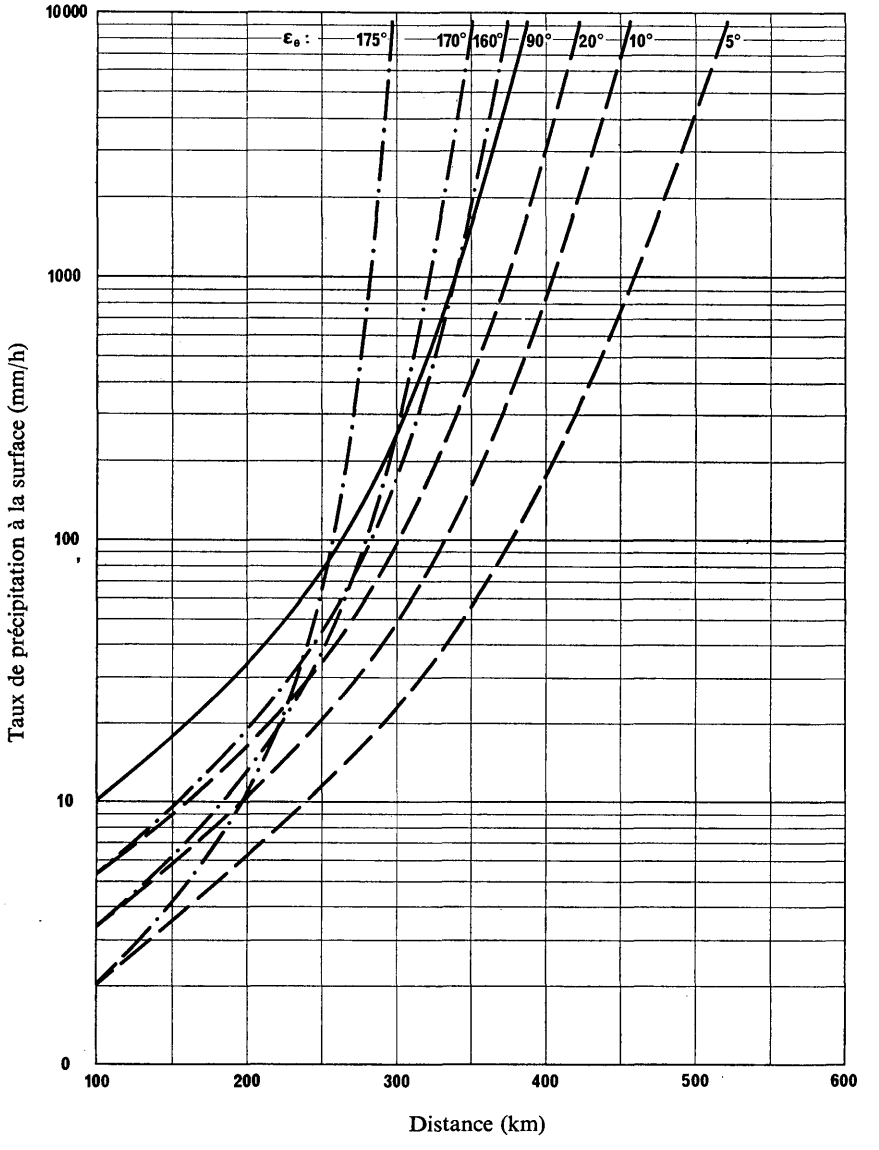


FIGURE 2

Distance de diffusion par les précipitations en fonction du taux de précipitation à la surface, à 6 GHz, pour un affaiblissement de transmission du système égal à 140 dB

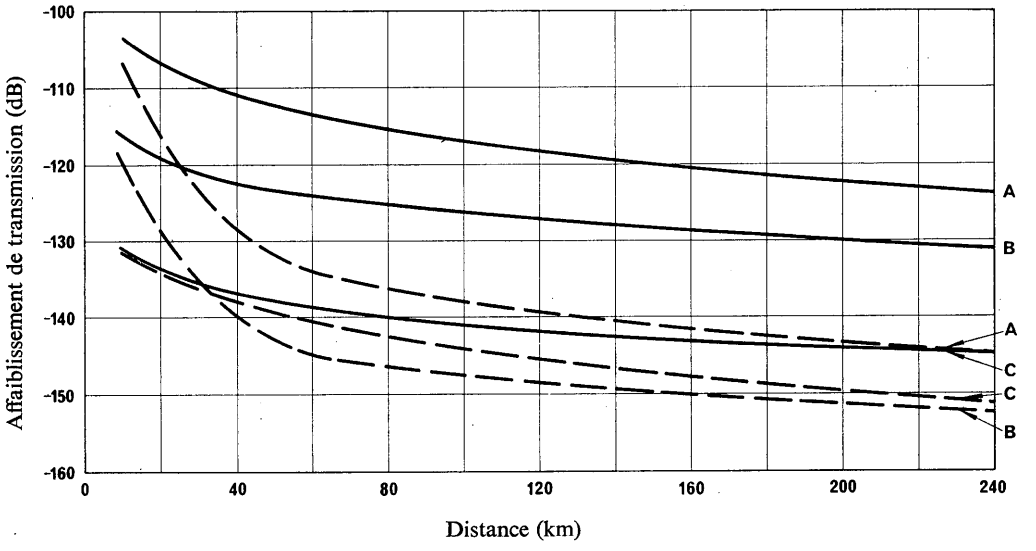


FIGURE 3

Affaiblissement de transmission en fonction de la distance pour des taux de précipitation donnés, à 12 GHz

——— Précipitations dans le volume commun

— — — Précipitations sur le trajet

Courbes A: 100 mm/h
B: 10 mm/h
C: 1 mm/h

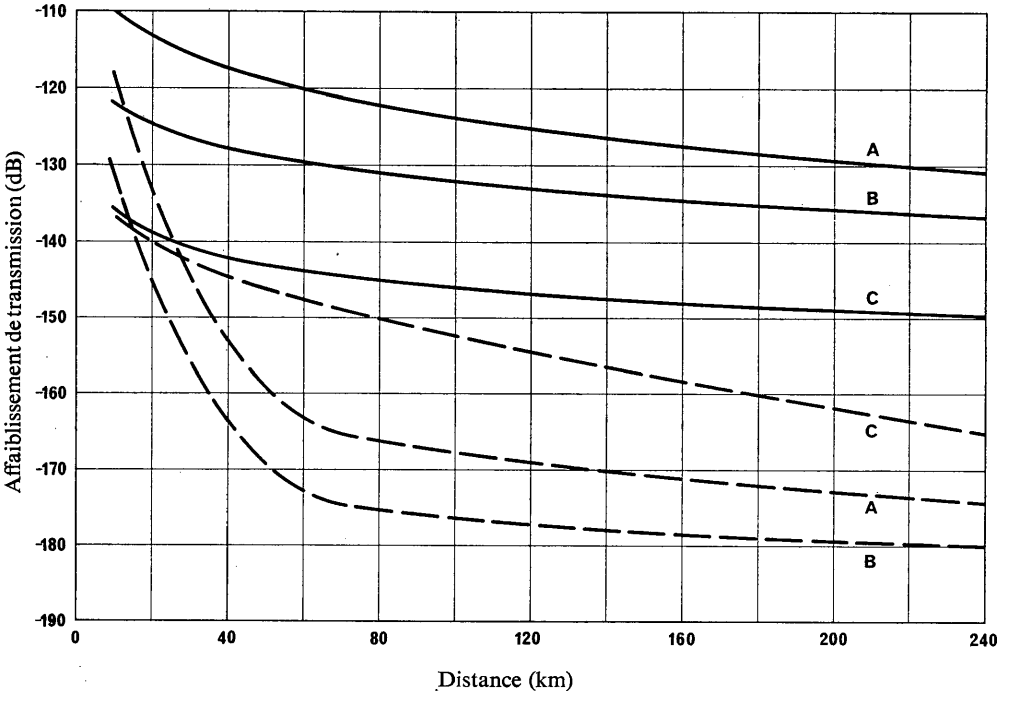


FIGURE 4

Affaiblissement de transmission en fonction de la distance pour des taux de précipitation donnés, à 18 GHz

——— Précipitations dans le volume commun

— — — Précipitations sur le trajet

Courbes A: 100 mm/h
B: 10 mm/h
C: 1 mm/h

RAPPORT 426 *

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)

Le Programme d'études 5-1C-1/5 prévoit la mise au point de méthodes de prévision du bruit radioélectrique, de l'absorption et de la réfraction des ondes dans les systèmes de télécommunication spatiale.

La Commission d'études 5 ne dispose actuellement pas de données expérimentales suffisantes pour élaborer ces méthodes. On sait, cependant, que de nouveaux travaux expérimentaux sont dès à présent entrepris et que d'autres doivent avoir lieu dans un proche avenir. On peut, en conséquence, espérer que la Commission d'études 5, lors de sa prochaine réunion, sera en mesure de fournir une description des méthodes à utiliser à l'intention de la Commission d'études 4.

Afin d'accélérer les travaux, chaque administration est priée:

— de recueillir des données expérimentales aussi nombreuses que possible sur la distribution statistique, en fonction du temps, de l'absorption et de la réfraction des ondes radioélectriques traversant la troposphère, ainsi que du bruit radioélectrique;

— d'envoyer dès que possible les données statistiques obtenues au Directeur du C.C.I.R. et aux Rapporteurs principaux des Commissions d'études 4 et 5.

Note 1. — Les travaux de la Commission d'études 5 seraient grandement facilités si les administrations voulaient bien faire parvenir les résultats de leurs travaux expérimentaux sur du papier de format A4 et sous la forme spécifiée au Tableau A ci-après.

Note 2. — Il conviendrait, de plus, d'envoyer des renseignements sur les points suivants:

— mesures de l'absorption et du bruit en appliquant les techniques de réception en diversité d'espace;

— corrélation entre l'absorption et le bruit;

— mesures statistiques des composantes de l'atmosphère, telles que les précipitations, mesurées de préférence avec des temps d'intégration courts. Ces mesures seraient fort utiles, même en l'absence de mesures portant sur les ondes et le bruit radioélectriques.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité. Vu les besoins spéciaux de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales qui doit se tenir en 1971, il convient que des données soient fournies en aussi grand nombre que possible pour le 30 septembre 1970. Le Directeur du C.C.I.R. enverra, à partir du 1er octobre 1970, deux copies des données reçues, à chaque administration.

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	°
5. Fréquence des signaux radioélectriques	GHz
6. Type de l'antenne et de son alimentation pour la station de mesure. . . .	
7. L'antenne est-elle protégée par un radome? (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 de mesure	

(1) Par exemple, le Soleil.

A 1

	Affaiblissement (dB) supérieur à l'affaiblissement en espace libre et dépassé pendant les pourcentages de temps suivants								
	99,99	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01
Période totale									
Mois au cours duquel l'affaiblissement a été maximal									

A 2

	Bruit (°K) dépassé pendant les pourcentages de temps suivants								
	99,99	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01
Période totale									
Mois au cours duquel le bruit a été le plus marqué									

A 3

	Réfraction (degrés d'arc) dépassée pendant les pourcentages de temps suivants								
	99,99	99,9	99	90	50	10	1	0,1	0,01
Période totale									

SECTION 5C: EFFETS DUS AU TERRAIN

AVIS ET RAPPORTS

Avis

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

Rapports

RAPPORT 229-1 *

DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DE LA SURFACE DE LA TERRE

(Question 1-1/5)

(1959 – 1963 – 1970)

1. Introduction

Le présent 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:

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

σ étant exprimée en mho/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 ω 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. Le Tableau I indique certaines constantes typiques du sol. Dans le cas de surfaces constituées d'eau ou de terrain très humide et pour les fréquences beaucoup plus élevées que 100 MHz, on tiendra compte de la variation de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, ainsi que de la conductivité globale (dipolaire et ionique) [1]. 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.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

TABLEAU I

Exemples de types de surface, de leurs caractéristiques électriques

Type de surface	ε	(σmho/m)
Eau de mer (0° C)	80	4 à 5 (jusqu'à 1 GHz)
Eau de mer (10° C)	73	4 à 5 (jusqu'à 1 GHz)
Eau douce (10° C)	84	1×10^{-3} à 1×10^{-2} (jusqu'à 100 MHz)
Eau douce (20° C)	80	1×10^{-3} à 1×10^{-2} (jusqu'à 100 MHz)
Terrain très humide	30	5×10^{-3} à 2×10^{-2}
Sol moyen	15	5×10^{-4} à 5×10^{-3}
Terrain arctique	15	5×10^{-4}
Terrain très sec et grandes villes (zones industrielles)	3	5×10^{-5} à 1×10^{-4}
Glace polaire	3	$2{,}5\times10^{-5}$

Dans le Tableau ci-dessus, la gamme des valeurs de conductivité pour un type de surface donné correspond aux différences que l'on constate entre les diverses parties du monde. Les valeurs les plus élevées sont valables pour les régions fertiles; l'eau des lacs et des rivières présente une conductivité qui augmente avec la concentration 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.

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} mho/m; or, on a pu montrer que, pour l'argile séchée, la conductivité peut descendre jusqu'à 10^{-4} mho/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 au 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 des échantillons de différents types de sol ont montré que la variation de la conductivité avec la température est de l'ordre de 2% par degré centigrade, la variation de la constante diélectrique étant, par contre, négligeable; au point de congélation de l'eau, les deux constantes varient d'une façon très rapide. 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. On notera cependant que les variations de la conductivité ne sont appréciables que pour des valeurs anormalement basses de l'humidité; d'autre part, la variation apparente de la constante diélectrique peut être due principalement à des effets de polarisation. Aussi n'est-il donc pas certain que, dans les conditions pratiques, la fréquence influe d'une façon substantielle sur la valeur des constantes dans les sols homogènes (voir cependant le § 3.6).

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. Le Tableau II donne ces valeurs pour la gamme de fréquences allant de 10 kHz à 1000 MHz et pour des valeurs moyennes des constantes électriques du sol.

TABLEAU II

Profondeur δ de pénétration en fonction de la fréquence

Fréquence	δ (m)				
	Eau de mer	Eau douce	Terrain très humide	Sol moyen	Terrain sec
10 kHz	2,5	70	50	160	500
100 kHz	0,8	20	16	52	170
1 MHz	0,25	11	5,5	21	95
10 MHz	0,08	9	3	16	90
100 MHz	0,02	4	2	16	90
1000 MHz	0,01	0,2	0,3	16	90

Ce Tableau montre que, notamment pour les surfaces constituées d'eau ou de terrain très humide, la profondeur de pénétration varie considérablement en fonction de la fréquence. Ce n'est que pour un sol sec ou moyen et au-delà de 10 MHz que cette profondeur est indépendante de 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; dans les calculs de propagation, on peut être amené à tenir compte de ces pertes d'énergie dans les valeurs adoptées pour les constantes du sol.

En particulier, on a constaté que l'affaiblissement de l'onde de sol au-dessus d'un terrain boisé, à la fréquence de 75 MHz, peut être beaucoup plus important pour une onde polarisée verticalement que pour une onde polarisée horizontalement [2].

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 [3]. 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 [4].

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 meublé 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 [5].

4.6 *Mesure de la variation de phase*

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 *Mesure du coefficient de réflexion*

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 élevées.

4.8 *Dispersion des ondes due aux brouillages atmosphériques*

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.

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 [4]. 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 [6].

La méthode par mesure de l'affaiblissement de l'onde de sol est l'une des 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'influent pas exagérément sur les résultats, à moins évidemment de vouloir étudier plus particulièrement cet effet.

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.

BIBLIOGRAPHIE

1. SAXTON, J.A. et LANE, J.A. Electrical properties of sea water. *Wireless Engineer* (octobre 1952).
2. C.C.I.R. Doc. V/24 (République Fédérale d'Allemagne), 1959-1963.
3. C.C.I.R. Doc. V/20 (République Populaire de Pologne), 1959-1963.
4. C.C.I.R. Doc. V/1 (République Fédérale d'Allemagne), 1959-1963.
5. KACHPROVSKI, V. The propagation of radio waves and conductivity. *Radio Journal of U.S.S.R.* (1958) (en russe). Traduction en anglais du National Bureau of Standards T1-60 (juin 1959).
6. C.C.I.R. Doc. V/21 (République Populaire de Pologne), 1959-1963.

RAPPORT 230-1 *

PROPAGATION DES ONDES SUR TERRAIN NON HOMOGÈNE

(Question 1-1/5)

(1956 – 1959 – 1963 – 1970)

Des progrès très importants ont été accomplis dans la recherche d'une solution au problème que pose la propagation au-dessus d'un terrain non homogène et accidenté. Ces progrès consistent, en particulier, en une généralisation des conditions dans lesquelles il est possible d'effectuer l'analyse mathématique rigoureuse du problème et de présenter cette analyse sous une forme telle que l'ingénieur puisse l'utiliser dans la pratique.

En raison de la grande complexité de ce problème, on a été amené à faire des hypothèses simplificatrices pour l'étude théorique: c'est ainsi, par exemple, que l'on considère un trajet de propagation composé de sections homogènes et bien définies et que l'on admet une stratification du sol parallèle à la surface de la Terre, cette surface étant considérée comme régulière. On étudie actuellement la possibilité d'étendre l'analyse à des cas généraux rencontrés plus fréquemment dans les conditions réelles. On a accompli des progrès dans l'étude du cas où deux sections d'un trajet sont séparées par une zone de transition et dans celle du cas où une variation des constantes électriques du sol est liée à une variation de hauteur de la surface. Pour une bibliographie complète, voir le Rapport 230, Oslo, 1966.

Même dans l'étude de cas idéaux, on est obligé d'avoir recours à certaines approximations mathématiques; celles-ci sont généralement légitimes, sauf peut-être en ce qui concerne le champ au voisinage d'une non-homogénéité notable. A ce propos, on pourra se reporter à une intéressante étude de Wait [A. 9] portant sur le champ au voisinage de la frontière entre deux sections consécutives d'un trajet; l'auteur emploie une méthode analytique plus précise.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

Ce faisant, il pose l'hypothèse que les impédances de surface des deux sections restent constantes jusqu'à la frontière; mais bien qu'il ait fait remarquer que cette hypothèse n'est pas justifiée aux distances assez courtes pour être comparables à la profondeur de pénétration dans le sol, cette restriction n'est pas très sévère puisque la profondeur de pénétration est généralement très inférieure à une longueur d'onde en espace libre.

Godzinski [F.9] a étendu cette analyse au cas où deux sections homogènes sont séparées par une zone de transition dans laquelle l'impédance de surface varie linéairement et il a déterminé la fonction d'affaiblissement complexe pour tous les points voisins des frontières. Ses résultats montrent que les détails de la zone de transition n'ont pas d'importance pourvu que la largeur de cette zone soit petite par rapport à la longueur d'onde. Cependant, son analyse est incomplète du point de vue formel car elle suppose une discontinuité de la dérivée de l'impédance de surface au début et à la fin de la zone de transition.

L'hypothèse d'une impédance de surface constante ou à variation linéaire dans une région horizontale finie de la surface de la Terre est tout à fait équivalente à l'introduction de charges linéaires virtuelles parallèles aux frontières puisque, si le champ magnétique tangentiel est continu à la traversée d'une frontière, le champ électrique tangentiel (qui est perpendiculaire à la frontière) doit être discontinu. Cela est équivalent à l'existence de charges linéaires magnétiques le long de la frontière.

Heureusement, ces charges virtuelles sur les frontières de séparation n'ont pas de signification pratique, sauf pour un observateur placé très près d'une frontière très bien définie comme une côte maritime. Cette conclusion a été confirmée par des expériences sur modèle faites à l'Université du Colorado.

Les mémoires énumérés ci-après exposent des représentations graphiques qui permettraient à l'ingénieur de résoudre certains problèmes de propagation dans des sections de trajet bien définies ou de faire des calculs approchés de la réfraction côtière:

— FEINBERG, E.L. [C.1] donne des graphiques relatifs à la réfraction côtière pour les longueurs d'onde de 300 et 600 mètres;

— WAIT, J.R. [A.7] et WAIT, J.R. et HOUSEHOLDER, J. [A.8] présentent, sous forme graphique, des données d'affaiblissement et de phase pour des trajets plans et sphériques à deux sections, et pour plusieurs valeurs de la conductivité;

— FURUTSU, K. [A.1, A. 4; E.1] donne des représentations graphiques de la fonction d'affaiblissement pour des trajets plans à deux sections, pour certains trajets plans à trois sections et pour des trajets sphériques à sections multiples, homogènes et de très grande longueur;

— GODZINSKI, Z. [A.10] donne des courbes qui permettent de calculer simplement l'affaiblissement et la phase pour des trajets plans à deux et trois sections et pour des trajets sphériques à sections multiples, dans le cas particulier où les sections sont alternativement courtes et longues;

— WAIT, J.R. [A.13] donne, sous forme de tableaux et de graphiques, les coefficients d'amplitude et de phase pour des trajets à deux sections sur une terre plate et une terre sphérique, dans les gammes d'ondes kilométriques et hectométriques (bandes 4, 5 et 6).

Les auteurs de ces mémoires font l'hypothèse que les frontières entre les sections sont nettes, alors que dans la pratique le passage d'une section à une autre peut être plus ou moins progressif. Toutefois, une étude de l'influence d'une zone de transition entre les sections a montré que dans certains cas particuliers, tout au moins à de grandes distances de la frontière, on a le droit d'admettre que cette frontière est nette et non pas progressive [C.1; A.11; F.9].

En ce qui concerne l'étude de la réfraction due aux non-homogénéités du trajet, il apparaît que cette étude pourra, dorénavant, englober la discussion des variations possibles de la polarisation des ondes au voisinage des non-homogénéités, ainsi que l'influence qui en résulte sur les erreurs de radiogoniométrie [A.6]. Par ailleurs, les travaux effectués au Royaume-Uni [A.12] donnent à penser que, dans la plupart des cas pratiques, il y a prédominance d'impor-

tantes erreurs statistiques et qu'il n'est guère possible de se fier à des résultats de mesure pour contrôler les estimations théoriques concernant la déviation de l'onde de sol au passage d'une ligne côtière. De même, il est difficile de vérifier la théorie de la propagation des ondes parallèlement à une frontière, au moyen de mesures de champ effectuées le long d'une ligne côtière.

On a discuté de l'influence qu'exerce la stratification horizontale du sol [B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 et A.13] et cette discussion a révélé qu'il est possible d'utiliser des constantes équivalentes du sol dont dépendent à la fois l'affaiblissement de l'onde et la forme de son ellipse de polarisation. Dans les cas où la non-homogénéité du sol est de nature plus complexe, la relation entre les constantes équivalentes du sol et la forme de l'ellipse de polarisation est, elle aussi, beaucoup plus compliquée, et c'est là un facteur important dont il faut tenir compte dans les mesures des constantes électriques du sol.

Les variations des constantes électriques du sol ont une influence sur l'amplitude, la phase, l'ellipse de polarisation et le facteur de gain dû à la hauteur, relatifs à l'onde de sol. Toutefois, aucune de ces caractéristiques n'est liée d'une manière simple aux valeurs locales des constantes du sol. Ce problème présente de l'importance en ce qui concerne les possibilités de prospection géologique par des procédés radioélectriques et il conviendrait de l'étudier à l'avenir d'une façon approfondie.

On notera que l'on a recours à la notion d'impédance de surface dans un nombre de plus en plus grand d'études théoriques reposant sur l'hypothèse de conditions limites approximatives. On peut penser que cette tendance présente de l'intérêt pour les ingénieurs praticiens, auxquels cette notion est familière dans d'autres domaines techniques. Il existe, en fait, une analogie étroite entre les lignes de transmission non homogènes et un sol à stratification horizontale, analogie qui pourra se révéler utile dans le calcul des constantes équivalentes du sol [B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, A.13 et A.14].

En raison de la complexité des méthodes théoriques, on a comparé celles-ci [F.8] avec les méthodes semi-empiriques les plus couramment utilisées [F.3 à F.6], à savoir la méthode de Millington et la méthode de la distance numérique équivalente (méthode de la conductivité équivalente) [F. 1 et F. 2]. On a constaté que la méthode de Millington est en bon accord avec la théorie et on peut en conclure que cette méthode convient pour la majorité des cas réels [F. 10]. L'accord est meilleur pour l'amplitude que pour la phase, mais, même en présence de variation de phase, la méthode de Millington donne des résultats qui restent dans les limites des mesures courantes, compte tenu des difficultés signalées plus haut.

La méthode de la distance numérique équivalente, ou méthode de la conductivité équivalente, présente l'avantage de la simplicité lorsqu'on a à faire de nombreux calculs, mais dans certains cas elle est la source d'erreurs importantes. Aussi, lorsqu'on emploie cette méthode, faut-il s'attacher essentiellement à rester dans son domaine d'application limité et, au besoin, à contrôler les résultats au moyen d'autres méthodes, ces contrôles étant effectués en un certain nombre de points compris dans le domaine à étudier.

Jusqu'à présent, on a toujours admis que le sol, quoique non homogène, était exempt d'accidents de terrain, qu'il fût plan ou sphérique. On admet, maintenant, que les accidents de terrain éventuels peuvent influer sur l'étude des non-homogénéités. Toutefois, l'étude d'un problème aussi général présente des difficultés extrêmement grandes [C.1 à C.7]. C'est en quoi les travaux de Furutsu [C.2, C.3 et C.8] se révèlent très précieux; cet auteur montre l'analogie étroite qui existe entre la propagation en terrain non homogène et la propagation sur une surface présentant de faibles ondulations et, de plus, il a réussi à inclure, dans une même étude, ces deux aspects de la propagation de l'onde de sol. Il donne des formules et des courbes pour quelques cas particuliers qui sont susceptibles de revêtir une grande importance au point de vue pratique et il a ouvert la voie à une étude plus générale du problème qui tiendrait compte à la fois des accidents de terrain et des non-homogénéités du sol.

Dans le cas de la propagation sur des trajets terrestres relativement longs sur ondes kilométriques, comme dans le cas de certains systèmes de navigation utilisant des impulsions, il devient très difficile de déterminer analytiquement les fonctions d'affaiblissement et de phase par suite de la répartition complexe des constantes du sol, tant verticalement qu'horizontalement, en raison notamment du fait que l'on ne possède pas de renseignements précis sur cette répartition. On a proposé [D. 1] de déterminer la conductivité équivalente du terrain non

homogène en mesurant la dispersion présentée par des perturbations atmosphériques appropriées de nature impulsive (les mesures étant faites en deux points séparés de la source par des distances différentes) et en comparant cette dispersion avec celle calculée pour une terre sphérique homogène, pour plusieurs valeurs de la conductivité. On estime que les résultats de prévision de la longueur électrique des trajets terrestres peuvent être améliorés au point de les rendre pratiquement aussi satisfaisants que pour un trajet maritime si la conductivité équivalente pour le trajet terrestre peut être déterminée avec une précision d'un ou deux chiffres significatifs. Les caractéristiques des terrains homogènes et des terrains non homogènes ont fait l'objet d'un grand nombre d'études théoriques (voir la section D de la bibliographie), mais il y a lieu de poursuivre les comparaisons avec les résultats expérimentaux.

Grâce à l'emploi de méthodes modernes faisant appel à des ordinateurs, Johler et Berry [C. 9] ont réussi à prévoir la phase et l'amplitude d'impulsions à 100 kHz qui se sont propagées au-dessus d'un terrain non homogène et accidenté. Pour plus de commodité, ces auteurs ont choisi des accidents de terrain qui avaient des sections verticales de forme gaussienne, mais la méthode peut être appliquée également à des formes et à des constantes du sol qui sont totalement arbitraires. Ici aussi, il faudra recueillir des données expérimentales afin de les comparer aux résultats analytiques.

BIBLIOGRAPHIE

A. Recherches théoriques concernant la propagation en terrain non homogène

1. FURUTSU, K. Propagation of electro-magnetic waves over a flat earth across a boundary separating different media and coastal refraction. *J. Radio Res. Labs.* (Tokyo), **2**, 1 (1955).
2. FURUTSU, K., WILKERSON, R.E. et HARTMANN, R.F. Some numerical results based on the theory of radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *NBS Journal of Research*, **68D**, 827 (1964).
3. FURUTSU, K. Calculated curves for ground wave propagation over inhomogeneous earth with pronounced features. *NBS Journal of Research*, **69D**, 1011 (1965).
4. FURUTSU, K. Propagation of electro-magnetic waves over a flat earth across two boundaries separating three different media. *Ibid.*, **2**, 239 (1955).
5. FURUTSU, K. Propagation of electro-magnetic waves over the spherical earth across boundaries separating different earth media. *Ibid.*, **2**, 345 (1955).
6. SENIOR, T.B.A. Radio propagation over a discontinuity in the earth's electrical properties: I et II Coastal refraction. *Proc. I.E.E.*, Part C. **104**, 43, 139 (1957).
7. WAIT, J.R. Mixed path ground-wave propagation: 1. Short distances. *NBS Journal of Research*, **57**, 1 (1956).
8. WAIT, J.R. et HOUSEHOLDER, J. Mixed-path ground-wave propagation: 2. Larger distances. *Ibid.*, **59**, 19 (1957).
9. WAIT, J.R. Amplitude and phase of the low-frequency ground wave near a coastline. *Ibid.* **58**, 237 (1957).
10. GODZINSKI, Z. The use of equivalent secondary sources in the theory of ground-wave propagation over an inhomogeneous earth. *Proc. I.E.E.*, Monograph No. 299 R (avril 1958), publié à nouveau aux *Proc. I.E.E.*
11. HOUTSMULLER, J. Ground-wave propagation. Mixed path. *Tijdschr. Nederl. Radiogen.* Vol. 24, **1**, 1-10 (1959).
12. C.C.I.R. Doc. IV/2 (Royaume-Uni), 1956-1959.
13. WAIT, J.R. The propagation of electromagnetic waves along the earth's surface. *Proc. Symposium on electromagnetic waves*, **6**, Math. Research Center, U.S. Army (1961).
14. WAIT, J.R. On the theory of mixed-path ground-wave propagation on a spherical earth. *NBS Journal of Research*, **65D**, 401 (1961).

B. Recherches théoriques concernant la propagation en terrain stratifié

1. GROSSKOPF, J. Das Strahlungsfeld eines vertikalen Dipolsenders über geschichtetem Boden (Champ de rayonnement d'un dipôle vertical au-dessus d'un terrain stratifié). *Hochfr. und El. Ak.*, **60**, 136 (1942).
2. WAIT, J.R. Radiation from a vertical electric dipole over a stratified ground. *Trans. IRE*, Vol. AP-1, 9 (1953).
3. WAIT, J.R. et FRASER, W.C.G. Radiation from a vertical dipole over a stratified ground. (Part. II), *Ibid.*, Vol. AP-3, 144 (1954).

4. WAIT, J.R. Theory of electromagnetic surface waves over geological conductors. *Geofisica Pura Appl.*, **28**, 47 (1954).
5. WAIT, J.R. Radiation from a vertical antenna over a curved stratified ground. *NBS Journal of Research* **56**, 237 (1956).
6. BREKHOVSKIKH, L. M. Ondes en milieu stratifié. Publié par l'*Ac. Sci. U.R.S.S.*, Moscou (1957), (en russe).

C. Recherches théoriques concernant la propagation en terrain irrégulier et non homogène

1. FEINBERG, E. L. Propagation des ondes radioélectriques sur des surfaces réelles. *Réf.* A.1, 97 (en russe).
2. FURUTSU, K. On the multiple diffraction of electromagnetic waves by spherical mountains. *Journal of Radio Res. Labs.*, (Tokyo), **3**, 331 (1956).
3. FURUTSU, K. Wave propagation over an irregular terrain (I), (II), (III). *Ibid.*, **4**, 135, 349 (1957), **6**, 71 (1959).
4. WAIT, J. R. On the theory of propagation of electromagnetic waves along a curved surface. *Can. J. Phys.*, **36**, 9 (1958).
5. KALININ, Yu. K. Perturbation du champ d'une onde radioélectrique plane par la non-homogénéité de la surface de la terre. *Radiotechn. i Elektron.*, **3**, 557 (1958) (en russe).
6. BREMMER, H. Applications of operational calculus to ground-wave propagation in particular to long waves. *Trans. IRE*, AP-6, **3**, 267-273 (1958).
7. BREMMER, H. *Encyclopedia of Physics*, éditée par S. Flügge, Springer, Berlin, **16**, Sect. 68-73, 531 (1958).
8. FURUTSU, K. Effect of ridge, cliff and bluff at coastal line on ground waves. *Journal of Radio Res. Labs.*, (Tokyo), **9**, 85 (1962).
9. JOHLER, J. R. et BERRY, L. A. Loran-D phase conditions over inhomogeneous irregular terrain. E.S.S.A. Technical Report. I.E.R. 59, I.T.S.A. 56 (novembre 1967).

D. Recherches théoriques concernant la propagation des impulsions en terrain non homogène

1. JOHLER, J.R. et LILLEY, C.M. Ground conductivity determinations at low radio frequencies by an analysis of sferic signatures of thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3233 (1961).

E. Articles concernant des représentations graphiques destinées à faciliter les calculs

1. FURUTSU, K. et KOIMAI, S. The calculation of field strength over mixed paths on a spherical earth. *Journal of Radio Res. Labs.*, (Tokyo), **3**, 391 (1956).

F. Méthodes semi-empiriques

1. GROSSKOPF, J. et VOGT, K. Der Zusammenhang zwischen der effektiven Bodenleitfähigkeit und der Ausbreitungsdämpfung (Relation entre la conductivité équivalente du sol et l'affaiblissement de propagation). *Hochfr. und El. Ak.*, **62**, 14 (1943).
2. GROSSKOPF, J. Zur Ausbreitung von Mittelwellen über inhomogenes Gelände (Propagation des ondes hectométriques sur terrain non homogène). *Fernmeldetechn. (FTZ)*, **3**, 118 (1950).
3. MILLINGTON, G. Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. I.E.E.*, Part III, **96**, 53 (1949).
4. MILLINGTON, G. et ISTED, G. A. Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth, Part, 2. Experimental evidence and practical implications. *Ibid.*, **97**, 209 (1950).
5. KIRKE, H. L. Calculation of ground-wave field strength over a composite land and sea path. *Proc. IRE*, **37**, 489 (1949).
6. PRESSEY, B. G., ASHWELL, G. E. et FOWLER, C. S. The measurement of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path. *Proc. I.E.E.*, Part III, **100**, 73 (1953).
7. SUDA, K. Evaluation du champ en ondes hectométriques sur les trajets mixtes. Doc. 140 et 232 du C.C.I.R. (Japon), Londres (1953).
8. GODZINSKI, Z. A comparison of Millington's method and the equivalent numerical distance method with the theory of ground-wave propagation over an inhomogeneous earth. *Proc. I.E.E.*, Part C, Monograph No. 318 R (décembre 1958).
9. GODZINSKI, Z. The surface impedance concept and the structure of radio waves over real earth. *Proc. I.E.E.*, Part C, **108**, 362 (1961).
10. TOMANKIEWICZ, T. et STASIERSKI, L. Détermination de l'affaiblissement de l'onde de sol à partir des mesures des caractéristiques électriques de la terre. *Prace Instytutu Lacznosci* (Rapports de l'Institut des télécommunications, Varsovie, République Populaire de Pologne), **2** (1966).

RAPPORT 236-2 *

INFLUENCE DES ACCIDENTS DE TERRAIN SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 1-1A/5)

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

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 229-1. 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 231-2, 233-2, 234-2, 235-1, 238-1, 244-2 et 285-2 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, d, ou de la distance angulaire, θ, et correspond à la loi, de formule $20 \log \theta + 10 \log d$, indiquée à la Fig. 4 du Rapport 244-2. L'autre cas extrême est celui d'une diffraction sur une terre sphérique régulière. 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.

---

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

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 [1, 3, 4].

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 239-2, qui est consacré aux données statistiques descriptives de propagation applicables au service de radiodiffusion et au service mobile.

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 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 [2]. 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 [1]. La résolution des intégrales est plus difficile dans des cas complexes et on a élaboré une méthode approchée [5, 6] dans le cas d'un nombre quelconque de crêtes aiguës successives.

On a étudié théoriquement les effets du sol sur la diffraction par une lame de couteau, par un escarpement et par une falaise côtière [7, 28, 29]. Dans le cas d'une falaise côtière, la vitesse de variation de la phase relative, en fonction de la distance de la côte, augmente en même temps que la hauteur de la falaise et elle est parfois beaucoup plus grande qu'en l'absence d'une falaise.

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 [8]. 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 [3].

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 [9, 10]. 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 superréfraction (courbes de l'Avis 370-1). 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 [9, 10, 11, 12, 13, 14].

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 [14].

On a effectué au Japon une étude sur la diffraction due à plusieurs crêtes, sur un grand nombre de trajets à ondes centimétriques [15]. 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 [15] 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 [9, 14]. 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 [16] 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 [17, 18] 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 [14]. 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 [2, 21, 22], échappant à l'influence de collines et de vallées voisines. L'analyse descriptive des données de radiodiffusion consignées dans le Rapport 239-2 et à l'Avis 370-1 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 [19]. Ce paramètre Δh est défini à l'Avis 370-1.

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 239-2, 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 [20, 22, 23], 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 [24], 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 [25].

4. Corrélation entre trajets

Des mesures effectuées en République Fédérale d'Allemagne [26] et au Royaume-Uni [27] 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.

Bibliographie

1. Millington, G., Hewitt, R. et Immirzi, F.S. Double knife-edge diffraction in field-strength predictions, I.E.E. Monograph 507 E (mars 1962).
2. Rice, P.L., Longley, A.G., Norton, K.A. et Barsis, A.P. Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits. NBS Technical Note 101, Vol. 1, Vol. 2 (7 mai 1965).
3. Furutsu, K. 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).
4. Furutsu, K. On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth. *NBS Journ. of Research*, **67D** (Radio Prop.) 1, 39-62 (janvier-février 1963).
5. Bauermeister, E. et Knöpfel, W. 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 (1952).
6. Wilkerson, R.E. Multiple knife-edge diffraction. *NBS Journal of Research* (1966).
7. Furutsu, K. Effect of ridge, cliff and bluff at a coastline on ground-waves. *Journal of Radio Research Laboratories* (Japan), Vol. 9, **41** (janvier 1962).
8. C.C.I.R. Doc. V/8 (Yougoslavie), 1959-1963.
9. Dickson et autres. *Proc. IRE* (août 1953).
10. Norton, K.A. et autres. 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 (octobre 1955).
11. Iwai, F. et autres. Radio transmission beyond the line-of-sight, etc. *Electrical Communications Laboratory Journal, N.T.T.* (Japon), Vol. 8, 1183 (septembre 1959).
12. Fukami, T. et autres. Propagation measurements on long mountain diffraction paths, etc. *Electrical Communications Laboratory Journal, N.T.T.* (Japon), Vol. 10, 2430 (décembre 1961).
13. C.C.I.R. Doc. V/28 (Japon), 1959-1963.
14. Kirby, R.S., Dougherty, H.T., et McQuate, P.L. Obstacle gain measurements over Pikes Peak at 60 to 1046 Mc. *Proc. IRE* 43, **10**, 1467-1472 (1955).
15. C.C.I.R. Doc. V/48 (Japon), 1963-1966.
16. C.C.I.R. Doc. V/18 (Royaume-Uni), 1963-1966.
17. C.C.I.R. Doc. V/29 (Japon), 1963-1966.
18. Okumura, Y. et Hara, M. Long-term properties of UHF path loss and multipath distortion on over-the-horizon radio link using obstacle gain path. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Tokyo, Vol. 13, **4** (1965).
19. C.C.I.R. Doc. V/38 (O.I.R.T.), 1963-1966.
20. C.C.I.R. Doc. V/24 (République Fédérale d'Allemagne), 1963-1966.
21. Beckmann, P. et Spizzichino, A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Pergamon Press, Londres, New York, Paris (1963).

22. THIESSEN, P. 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 (1964).
23. U.E.R. Monographie C (1965).
24. C.C.I.R. Doc. V/28 (République Populaire de Pologne), 1963-1966.
25. LAGRONE, A. H. Forecasting television service fields. *Proc. IRE*, Vol. 48, **6** (juin 1960).
26. C.C.I.R. Doc. V/42 (République Fédérale d'Allemagne), 1963-1966.
27. WISE, F. H. The influence of propagation factors on UHF television. *Television Society Journal*, Vol. 10, **11** (1965).
28. FURUTSU, K., WILKERSON, R. E. et HARTMAN, R. F. Some numerical results based on the theory of radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *NBS Journal of Research*, Vol. 68D, **7** (juillet 1964).
29. FURUTSU, K. Calculated curves for ground wave propagation over inhomogeneous earth with pronounced topographical features. *NBS Journal of Research*, Vol. 69D, **7** (juillet 1965).

RAPPORT 427 *

FACTEUR D'ÉCRAN DU TERRAIN A UTILISER DANS LE CALCUL DE LA DISTANCE DE COORDINATION

(Programme d'études 5-1F-1/5)

(1970)

1. Introduction

La Commission d'études 5 a étudié les questions posées dans la Question 14/4 concernant le facteur d'écran du terrain à utiliser pour le calcul de la distance de coordination et elle estime que les valeurs de ce facteur proposées lors de la Conférence administrative extraordinaire des radiocommunications (C.A.E.R.), Genève, 1963, sont en général un peu trop modérées. En outre, la Commission d'études 5 pense qu'il n'est pas possible de donner un seul tableau de valeurs du facteur d'écran du terrain, qui soient indépendantes de la longueur du trajet, et elle suggère que l'on utilise la méthode suivante pour calculer ces facteurs.

La méthode adoptée par la C.A.E.R., Genève, 1963, consiste à supposer que l'on connaît seulement l'angle de site et la distance de l'horizon radioélectrique entourant la station terrienne. Dans ces conditions, l'hypothèse la plus prudente qui puisse être faite sur le profil du terrain est que l'horizon radioélectrique comprend une arête vive au-delà de laquelle le terrain est régulier et au niveau de la mer (voir la Fig. 1).

2. Affaiblissements de diffraction

La différence entre l'affaiblissement sur ce profil de terrain hypothétique et l'affaiblissement sur la même distance au-dessus d'un terrain régulier représente le facteur d'écran du terrain. En général, celui-ci est positif, c'est-à-dire que l'obstacle introduit un affaiblissement supplémentaire. Néanmoins, la Fig. 1 montre que la distance angulaire entre l'obstacle et la position supposée d'une station de faisceaux hertziens est réduite, et il peut se faire que la réduction correspondante de l'affaiblissement par diffusion compense l'augmentation d'affaiblissement de diffraction sur l'arête de couteau. Dans un cas extrême, l'arête peut être visible

* Ce Rapport, conjointement avec le Rapport 337-1, remplace le Rapport 337, et a été adopté à l'unanimité.

à la fois de la station terrienne et de la station de faisceaux hertziens, et l'affaiblissement le long du trajet pourrait fort bien être inférieur à celui observé au-dessus d'un terrain régulier; dans ces conditions, le facteur d'écran du terrain serait négatif. C'est le phénomène connu sous le nom de « gain d'obstacle ».

L'affaiblissement de diffraction sur la crête peut se calculer à l'aide de la formule donnée dans le Rapport 244-2; il ne dépend que légèrement de la distance comprise entre la station de faisceaux hertziens et la crête, à condition que cette distance soit au moins double de celle de la station terrienne à la crête. On peut supposer que l'affaiblissement de diffraction ne varie pas avec le temps, puisque la variation de l'angle de diffraction sous l'effet de la réfraction est négligeable. Toutefois, les crêtes montagneuses naturelles sont très différentes d'une arête de couteau idéale et il est bon d'en tenir compte. On connaît des méthodes de calcul de l'affaiblissement sur des arêtes arrondies, mais leur mise en œuvre est assez compliquée et il est proposé ici d'augmenter de 5 dB l'affaiblissement de diffraction pour tenir compte de l'imperfection des arêtes naturelles [1].

L'affaiblissement le long du trajet qui est dépassé pendant 99,9% du temps, entre l'obstacle et la station de faisceaux hertziens, peut se calculer par la méthode indiquée dans le Rapport 244-2.

3. Affaiblissements supplémentaires dus à la diffusion troposphérique

Une autre méthode de détermination de l'affaiblissement supplémentaire dû à l'obstacle consisterait à supposer que ce dernier a pour seul effet d'augmenter la distance angulaire θ entre la station terrienne et la station de faisceaux hertziens. Il en serait ainsi si le terrain situé au-delà de l'obstacle était de nature à empêcher toute diminution de la distance angulaire entre l'obstacle et la station de faisceaux hertziens.

Dans ce cas, on peut déterminer l'augmentation de l'affaiblissement en calculant l'affaiblissement le long du trajet par la méthode indiquée au Rapport 244-2, avec majoration de l'angle de site de l'obstacle vu de la station terrienne.

4. Méthode de calcul

A titre d'exemple de calcul du facteur d'écran du terrain par les méthodes indiquées aux § 2 et 3, considérons le cas d'un obstacle situé à 16 km de la station terrienne, vu sous un angle de site compris entre 1° et 5°.

4.1 *Formules de diffraction*

La formule qui donne l'affaiblissement de diffraction par rapport à l'espace libre est indiquée sur la Fig. 3 du Rapport 244-2. Elle peut s'écrire:

$$D = 20 \log_{10} \left[\pi \sqrt{2} \sqrt{2 \frac{d_A + d_B}{\lambda} \operatorname{tg}\alpha_0 \operatorname{tg}\beta_0} \right] \text{(dB)}$$

les symboles figurant dans cette formule sont tirés de la Fig. 1. Lorsque α_0 et β_0 sont inférieurs à 10° et que d_B est supérieur à 2 d_A, on peut remplacer la formule ci-dessus par la formule suivante:

$$D = 20 \log_{10} \left[2\pi\theta \sqrt{\frac{d_A}{\lambda}} \right] \text{(dB)}$$

qui donne le même résultat à 2 dB près.

La distance d_A étant très voisine de la longueur ES (la distance du point E à la crête de l'écran), on peut calculer l'angle de diffraction θ au moyen de formules établies, dans l'hypothèse d'une terre sphérique, pour des valeurs données de θ_s, angle de site du sommet de l'écran par rapport au plan horizontal du point E. La variation de D en fonction de θ_s, à la fréquence 4 GHz et pour un trajet ES de 16 km, fait l'objet du Tableau I.

TABLEAU I

Affaiblissement de diffraction D à la fréquence 4 GHz

θ_s (degré)	1	2	3	4	5
θ (degré)	1,6	2,8	4,0	5,1	6,2
Affaiblissement de diffraction (dB)	38	43	46	48	50

Lorsque l'antenne de la station R est en visibilité directe par rapport à la crête de l'obstacle, l'angle de diffraction θ peut avoir une valeur différente de celle correspondant au point H, mais ceci n'affecte l'affaiblissement de diffraction que d'une valeur inférieure à 2 dB à condition que le point R soit situé à plus de 30 km de l'obstacle.

4.2 *Calcul des affaiblissements de diffusion sur le trajet*

La Fig. 2 donne une courbe représentant l'affaiblissement $L_{0,1}$ entre la station terrienne et la station de faisceaux hertziens en l'absence de l'obstacle. Cette courbe est déduite du Rapport 244-2, en supposant des hauteurs d'antenne de 15 m et 50 m respectivement pour la station terrienne et la station de faisceaux hertziens et en utilisant les données correspondant à un climat continental tempéré.

Les autres courbes de la Fig. 2 représentent l'affaiblissement $l_{0,1}$ entre l'obstacle et la station de faisceaux hertziens pour les hauteurs d'obstacle correspondant aux angles de site compris entre 1° et 5°.

4.3 *Valeurs calculées du facteur d'écran du terrain*

Le facteur d'écran du terrain dû à l'effet de la diffraction sur un obstacle à crête de couteau peut maintenant s'exprimer par la formule $D+l_{0,1}-L_{0,1}$ (dB). La variation de ce facteur en fonction de la longueur totale du trajet est représentée graphiquement à la Fig. 3 par les courbes en trait plein. On observe que, d'après ces courbes, la valeur du facteur d'écran du terrain diminue jusqu'à un minimum situé à une distance qui dépend de l'angle de site, et qu'il augmente ensuite.

Les courbes en tirets de la Fig. 3 représentent les facteurs d'écran du terrain tels que déterminés par la méthode décrite au § 3. On voit que ces facteurs commencent par augmenter avec la distance pour se stabiliser finalement à une certaine valeur.

Il est clair qu'en l'absence de renseignements sur le profil du terrain au-delà de l'obstacle, on est obligé de déterminer le facteur d'écran d'après la courbe donnant la valeur la plus basse, tout en prévoyant une marge de 5 dB pour tenir compte des imperfections de la lame de couteau. On voit qu'il est impossible de spécifier des valeurs du facteur d'écran qui soient indépendantes de la distance. Toutefois, on peut établir le tableau ci-après, qui donne les facteurs d'écran du terrain correspondant à diverses combinaisons de distance et d'angle de site.

Les valeurs données au Tableau II sont applicables lorsque les obstacles sont situés à des distances comprises entre 5 et 16 km de la station terrienne, mais peuvent être utilisées pour des distances plus courtes vers l'horizon, lorsque l'on sait que seuls les lobes latéraux ou postérieurs du diagramme de l'antenne de la station terrienne englobent l'obstacle (Doc. V/131 (Suède), 1966-1969).

TABLEAU II

Facteur d'écran du terrain (dB)
Climat continental tempéré

Angle de site (degré)	Distance (km)					
	100	150	200	300	400	500
1	20	15	11	8	8	8
2	(1)	21	18	17	17	17
3	(1)	(1)	23	23	23	23
4	(1)	(1)	(1)	28	28	28
5	(1)	(1)	(1)	33	33	33

(1) Dans ces cas, on peut utiliser la valeur numérique la plus élevée de chaque colonne lorsque l'on sait que seuls les lobes latéraux ou postérieurs du diagramme de l'antenne d'une station terrienne englobent l'obstacle à l'horizon.

Bien que le procédé décrit ci-dessus s'applique à une transmission sur trajet terrestre dans un climat continental tempéré on peut aussi l'utiliser pour les autres climats mentionnés au Rapport 244-2.

4.4 *Utilisation d'un facteur d'écran du terrain fonction de la distance*

Les facteurs d'écran du terrain donnés au Tableau II et à la Fig. 3 sont fonction de la distance. La méthode de calcul de la distance de coordination employée par la Commission d'études 4 (Rapport 382-1) vise à simplifier la procédure en choisissant des facteurs d'écran de terrain qui ne dépendent que de l'angle d'élévation vers l'horizon.

La description d'une autre méthode, comprenant l'effet d'écran du terrain, est donnée dans la référence [2]. Cette méthode utilise des profils de modèles de trajets semblables à ceux de la Fig. 1 qui ont été choisis après examen d'un grand nombre de profils réels de trajets entre une station terrienne et des emplacements de stations de faisceaux hertziens aux Etats-Unis d'Amérique.

Cette méthode donne des courbes de distance de coordination par rapport à l'affaiblissement de propagation requis pour divers angles de site vers l'horizon, et pour deux zones radioclimatiques. Ces courbes ont été calculées d'après des données valables sur la propagation (Rapport 244-2), mais il faudrait des études complémentaires pour les rendre universellement applicables.

L'attention de la Commission d'études 4 et des Administrations est attirée sur la référence [2] et il est suggéré que celle-ci soit étudiée en vue de déterminer si elle est préférable à la méthode indiquée dans le Rapport 382-1.

5. Influence de la diffusion due aux précipitations

Il arrive que la propagation par diffusion due aux précipitations annule en partie la majoration de l'affaiblissement due aux obstacles. Les renseignements dont on dispose sur ce mécanisme de propagation sont peu nombreux. Il faut, à cet égard, rassembler des données statistiques pluviométriques.

D'autres renseignements sur ce sujet sont contenus dans le Rapport 339-1.

BIBLIOGRAPHIE

1. C.C.I.R. Doc. V/48 (Canada), 1963-1966.
2. C.C.I.R. Doc. V/119 (IV/303) (Etats-Unis d'Amérique), 1966-1969.

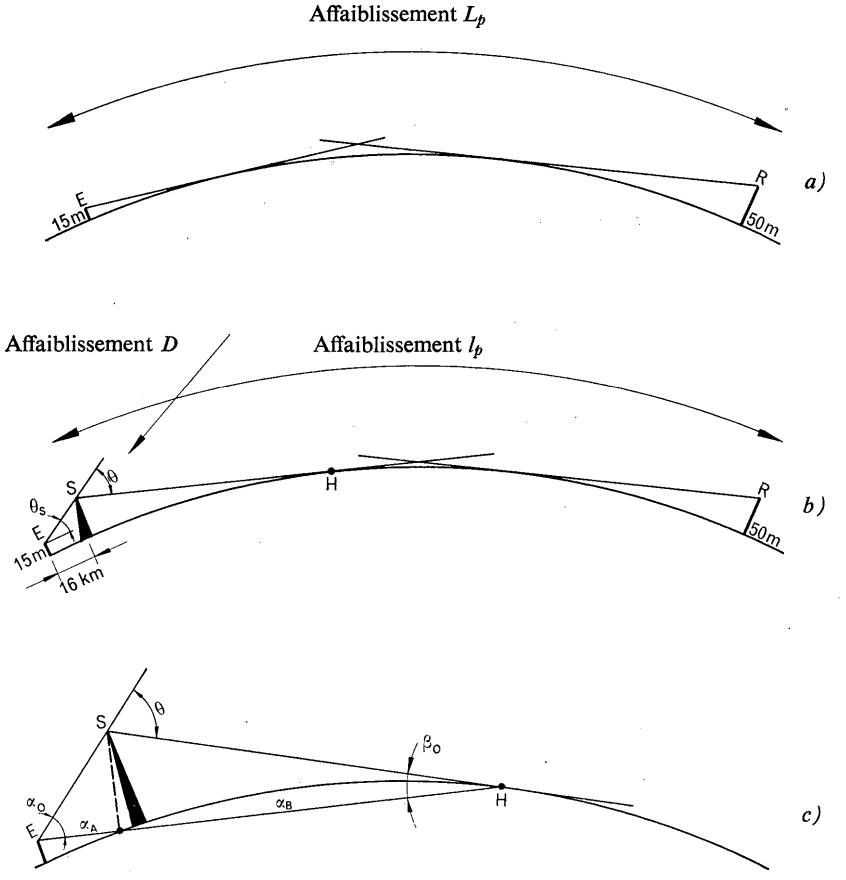


FIGURE 1

Méthode pratique à suivre pour calculer l'affaiblissement de diffraction dans le cas d'une crête montagneuse située sur un trajet qui, sans cela, ne serait pas en visibilité directe

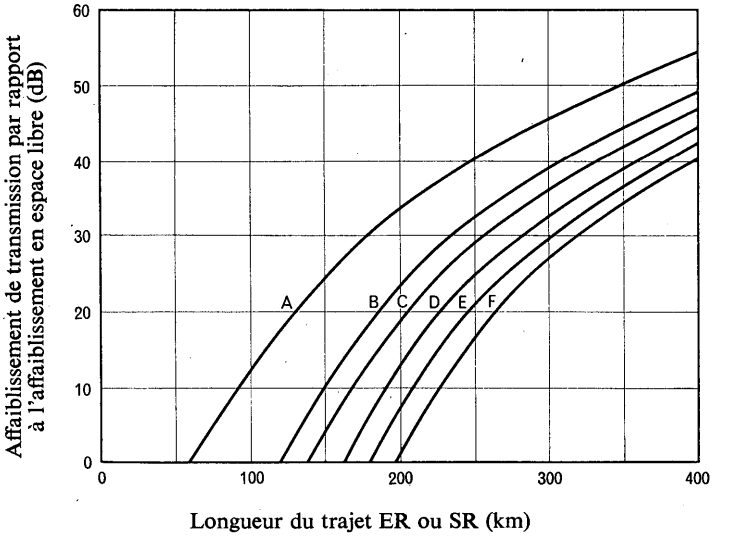


FIGURE 2

Affaiblissement de transmission non dépassé pendant 0,1 % du temps, à la fréquence 4 GHz, pour un climat continental tempéré, dans les conditions de la Figure 1

A: $L_{0,1}$ pour le trajet ER
B: $l_{0,1}$ pour le trajet SR ($\theta_s = 1°$, hauteur de l'obstacle = 311 m)
C: $l_{0,1}$ pour le trajet SR ($\theta_s = 2°$, hauteur de l'obstacle = 590 m)
D: $l_{0,1}$ pour le trajet SR ($\theta_s = 3°$, hauteur de l'obstacle = 870 m)
E: $l_{0,1}$ pour le trajet SR ($\theta_s = 4°$, hauteur de l'obstacle = 1155 m)
F: $l_{0,1}$ pour le trajet SR ($\theta_s = 5°$, hauteur de l'obstacle = 1425 m)

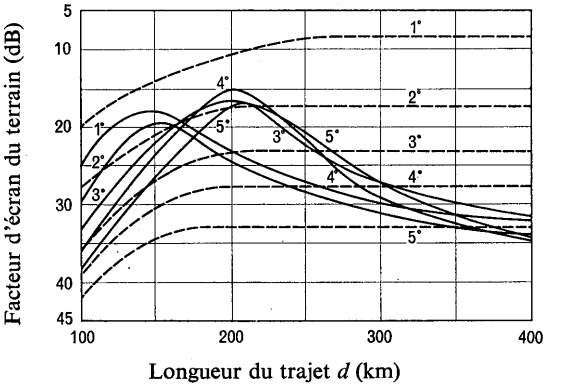


FIGURE 3

Facteur d'écran du terrain à la fréquence 4 GHz pour un climat continental tempéré (0,1 % du temps)

——— avec diffraction
– – – – avec diffusion troposphérique

SECTION 5D : PROPAGATION PAR L'ONDE DE SOL

AVIS ET RAPPORTS

Avis

AVIS 368-1

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

(Question 3/5)

(1951 – 1959 – 1963 – 1970)

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

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 aéronefs 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 dipôle électrique vertical idéal de Hertz, auquel une antenne verticale de longueur inférieure au quart d'onde est presque équivalente;

— le moment de ce dipôle est choisi de telle manière que le dipôle 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 3×10^5 μV/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 3×10^5 μV/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 par rapport à 1 μV/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 les 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. 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.

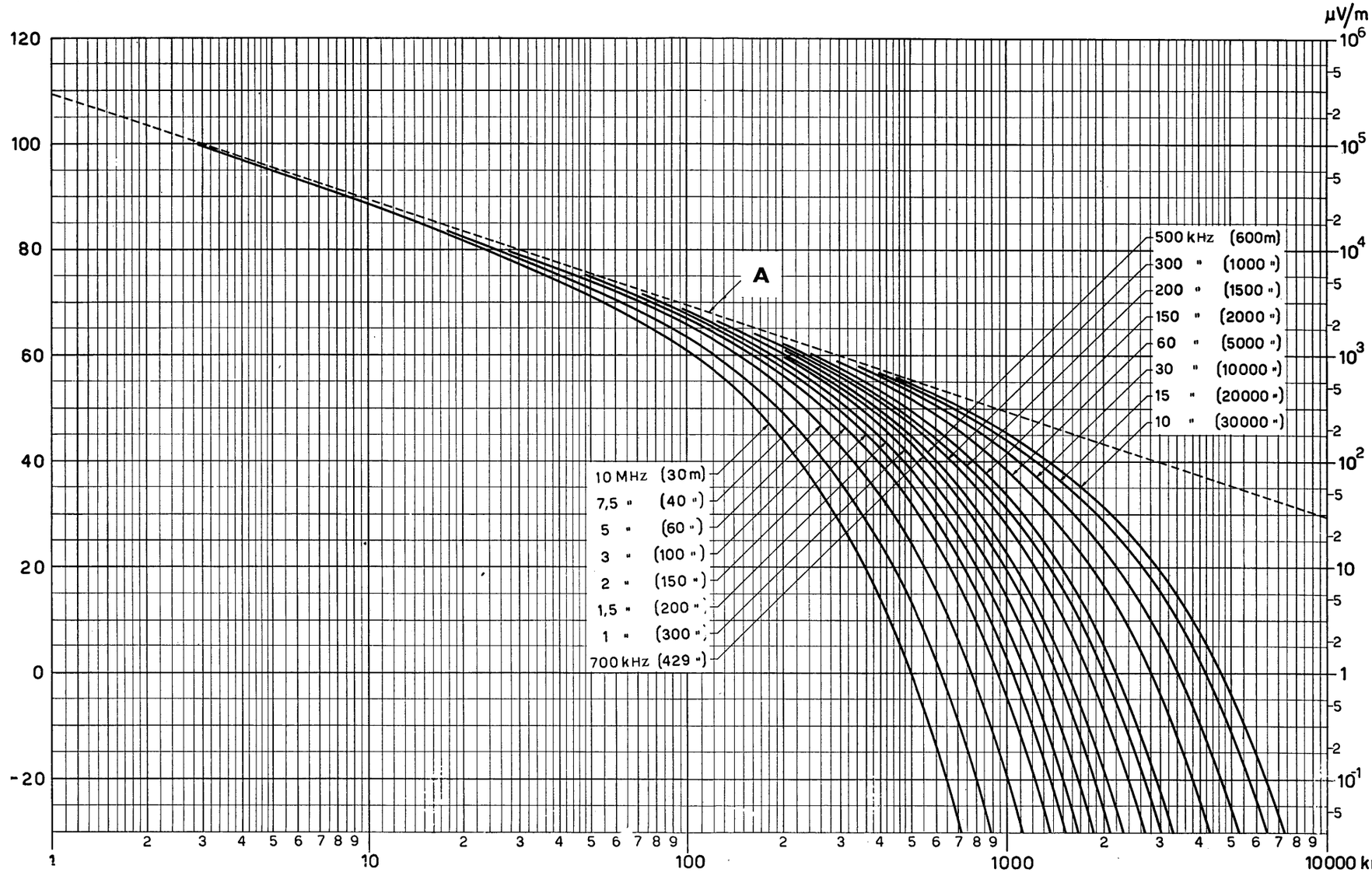


FIGURE 1

Courbes de propagation de l'onde de sol ; mer, σ = 4 mho/m, ε = 80

A : Inverse de la distance

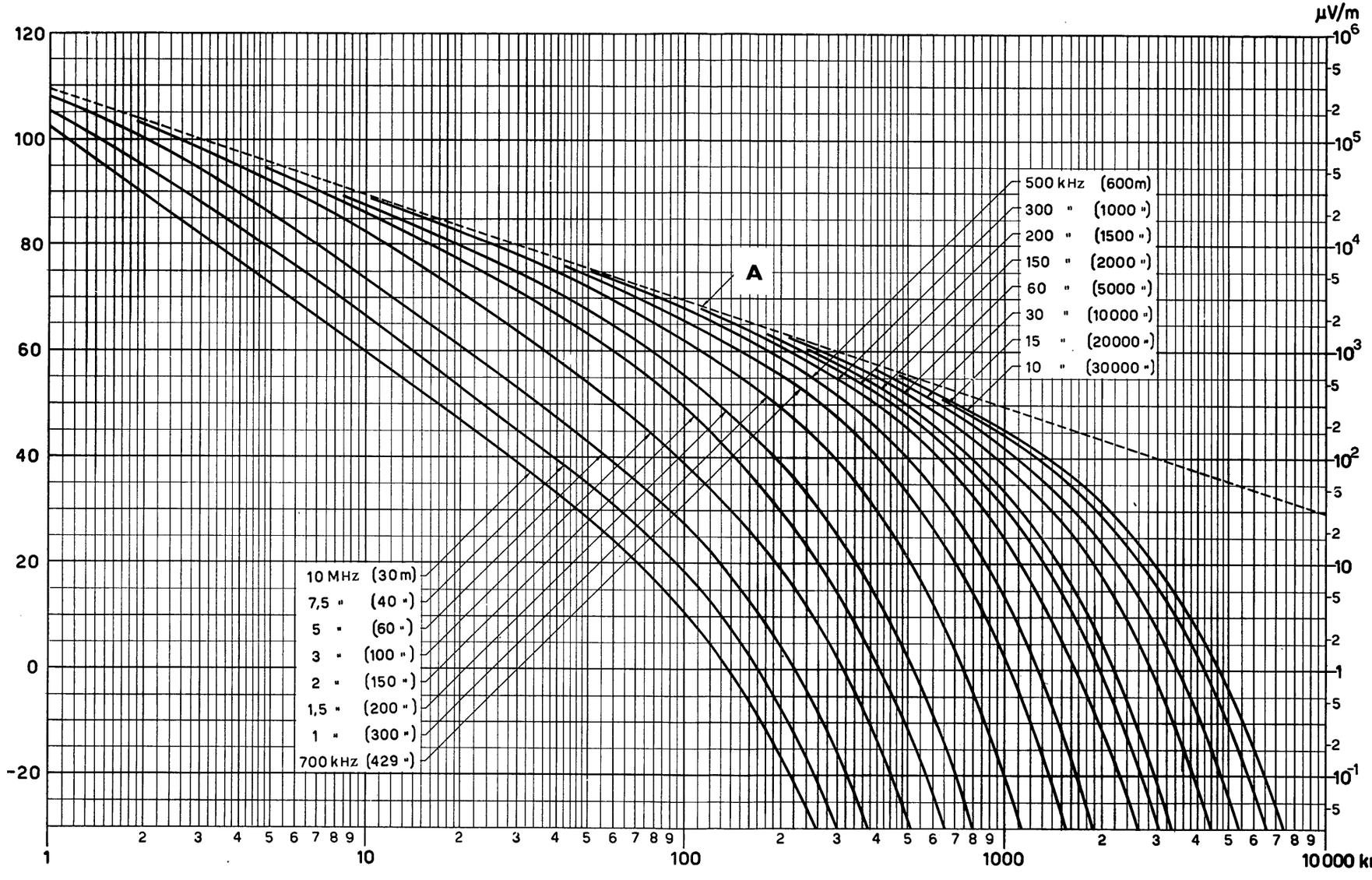


FIGURE 2

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

A: Inverse de la distance

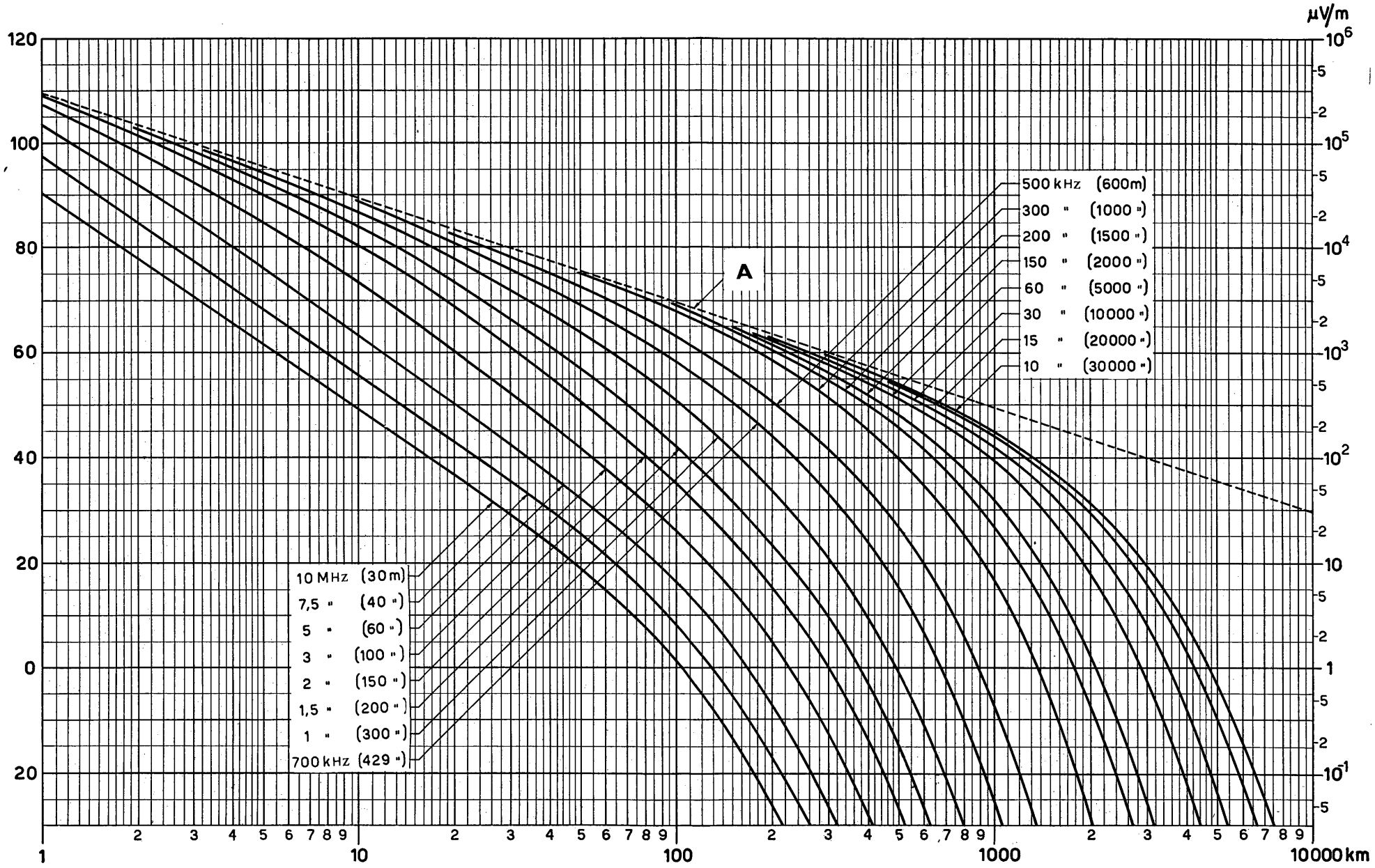


FIGURE 3

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

A: Inverse de la distance

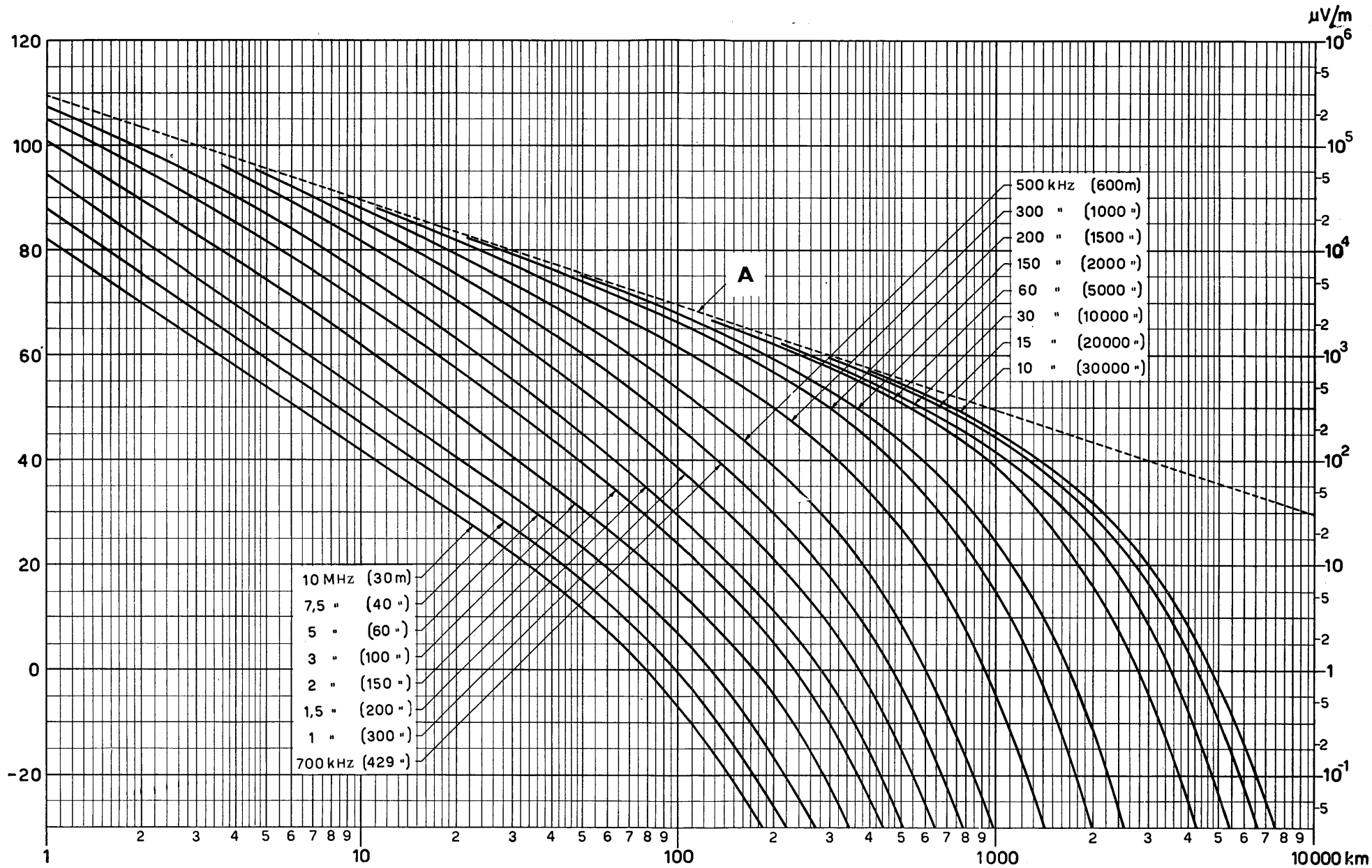


FIGURE 4

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

A: Inverse de la distance

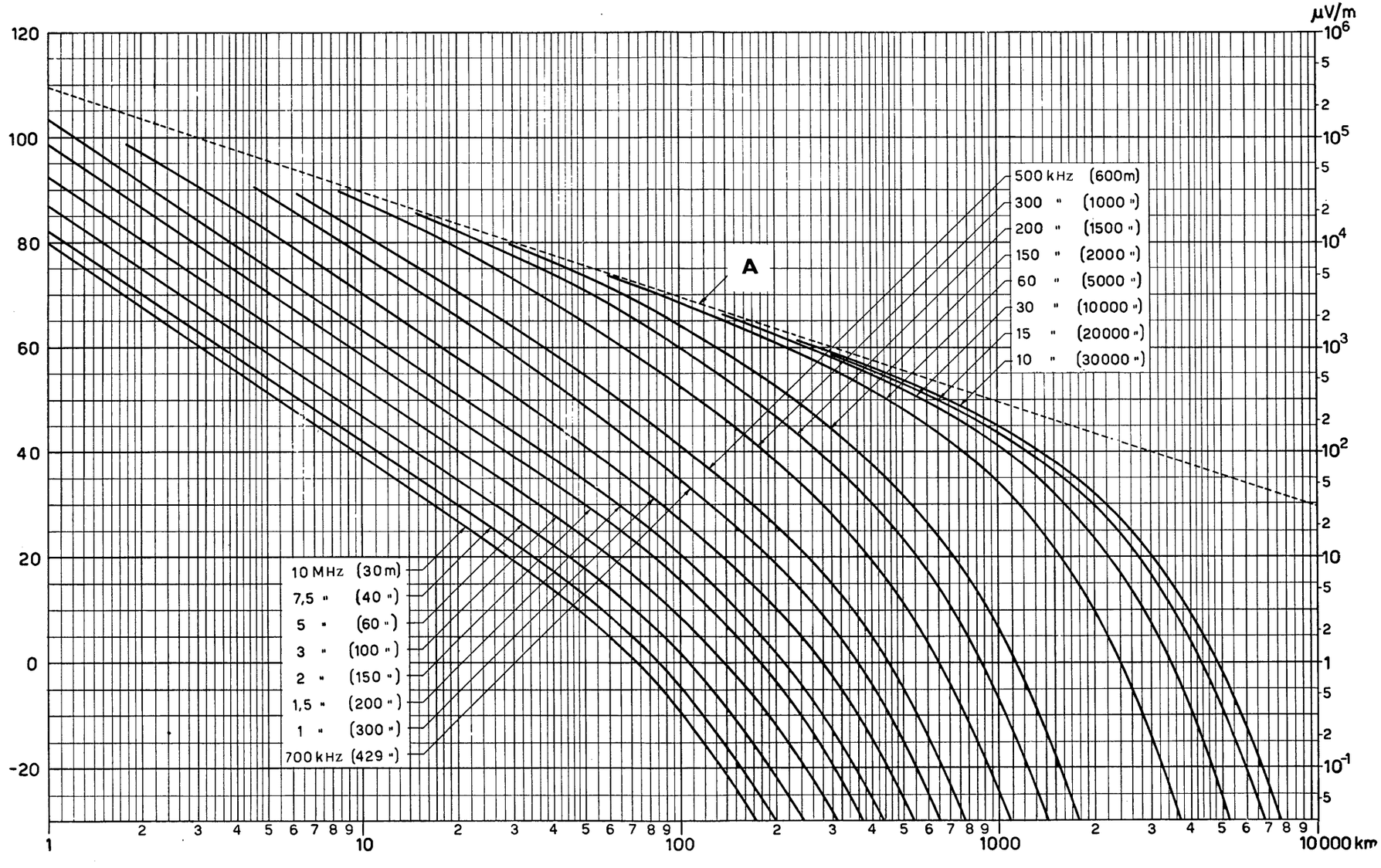


FIGURE 5

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

A: Inverse de la distance

5D: *Rapports*

RAPPORT 235-1 *

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

(Question 3/5)

(1956 - 1963 - 1970)

Les courbes de propagation de l'onde de sol représentées dans l'Avis 368-1 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 [1, 2], 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 368-1, 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 3/5.

Les progrès réalisés dans cette étude ont toutefois 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,

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

l'influence de l'ionosphère devient prédominante dans la propagation à grande distance, ainsi qu'il est indiqué au § 6 de l'Annexe de l'Avis 368-1.

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 de l'Avis 368-1.

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 de l'Avis 368-1, 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 3/5.

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. Ces expériences sont actuellement en cours mais on ne possède pas encore de résultats détaillés. Il convient de signaler que, lorsque l'on compare les résultats avec les 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 problème secondaire du calcul des valeurs absolues du champ peut être abordé une fois que l'on a résolu l'équation fondamentale aux valeurs propres.

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 § 5 de l'annexe à l'Avis 368-1, 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.

Même si l'on admet que l'étude mathématique du problème a été menée à bonne fin, 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 [1 et 2] et c'est là une raison suffisante pour ne pas tenir compte, pour le moment, de la fonction hauteur-gain.

Quoi qu'il en soit, on a accompli des progrès satisfaisants dans le calcul théorique de la fonction hauteur-gain, même pour des lois de variation de l'indice de réfraction telles que la

loi exponentielle [3 à 6], et lorsque l'on aura trouvé la solution définitive de l'équation fondamentale aux valeurs propres dans sa forme généralisée, il sera possible d'établir des courbes hauteur-gain pour des fréquences inférieures à 10 MHz à l'aide de méthodes de calcul modernes.

Certains travaux actuellement en cours, en vue de trouver la solution de l'équation aux valeurs propres, ont déjà donné des résultats encourageants. Ces travaux ont confirmé, par exemple, que la troposphère continue à exercer des effets notables sur une fréquence de 1500 kHz, comme le suggéraient les quelques données expérimentales disponibles. Cependant, il est encore trop tôt pour faire des prévisions en ce qui concerne les résultats définitifs de ces travaux.

Si l'on parvient à résoudre ce problème de façon satisfaisante, il faut espérer que les résultats obtenus seront inclus dans toute révision des courbes de propagation pour l'onde de sol données à l'Annexe de l'Avis 368-1, comme cela est envisagé dans le Rapport 428.

BIBLIOGRAPHIE

1. C.C.I.R. 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, 1955).
2. C.C.I.R. 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, 1959).
3. BREMMER, H. 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 Journal of Research*, **64D**, 467 (1960). Part II: Expansion of the rigorous solution. *Ibid.*, **66D**, 31 (1962).
4. NORTON, K. A. System loss in radiowave propagation. *Ibid.*, **63D**, 53 (1959).
5. MILLINGTON, G. Propagation at great heights in the atmosphere. *Marconi Review*, **21**, 143 (1958).
6. WAIT, J. R. On the propagation of radiowaves in an inhomogeneous atmosphere. *NBS Technical Note 24* (1959).

RAPPORT 428 *

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

(Avis 368-1, Rapport 235-1)

(1970)

Le Rapport 235-1 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 368-1 dans lesquelles il n'est pas tenu compte des effets de la troposphère ni de ceux du gain en fonction de la hauteur. De plus, les usagers ont constaté que la gamme des valeurs de constante diélectrique et de conductivité indiquées dans ce projet d'Avis n'est pas assez vaste pour englober celle des valeurs indiquées au Tableau I du Rapport 229-1.

* Ce Rapport a été adopté à l'unanimité.

Etant donné que l'on dispose d'un ordinateur au siège de l'U.I.T., il serait souhaitable que le Secrétariat du C.C.I.R. entreprît l'établissement d'un programme d'ordinateur qui pourrait être utilisé pour n'importe quelle combinaison des valeurs de ε et de σ, en vue d'augmenter le nombre des courbes de l'Avis 368-1. Ainsi l'on pourrait prendre en considération une gamme plus étendue des valeurs de ε et de σ ainsi que la bande des fréquences comprises entre 10 et 30 MHz dont il n'est tenu compte actuellement ni dans cet Avis, ni dans les Atlas du C.C.I.R.

Pour l'établissement du programme 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 235-1, 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.

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 229-1.

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.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES, RÉSOLUTIONS ET VŒUX

(COMMISSION D'ÉTUDES 5)

QUESTION 1-1/5

PROPAGATION SUR TERRAIN NON HOMOGÈNE ET ACCIDENTÉ

(1965 - 1966 - 1970)

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 les avantages 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 1-1A/5 *

EFFETS DES ACCIDENTS DE TERRAIN SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

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

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;

b) que la propagation par-dessus la crête des hautes montagnes présente 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,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. mesure de l'affaiblissement de transmission sur des trajets passant par dessus une crête de montagne et comparaison avec les valeurs calculées dans le cas de la diffraction sur une lame de couteau unique;

2. influence de l'existence de plusieurs obstacles sur un même trajet;

3. influence du rayon de courbure et de la nature du sol au sommet d'une montagne;

4. affaiblissement produit par l'irrégularité générale du terrain, appelée facteur de terrain, aussi bien dans la zone de service autour d'un émetteur que pour les ondes qui proviennent d'un émetteur situé à une grande distance;

5. variations locales du champ dans une zone de réception donnée pour un émetteur proche et pour un émetteur éloigné, et leur corrélation en fonction des accidents de terrain et de la direction d'arrivée des ondes à la réception;

---

* Ce Programme d'études remplace le Programme d'études 6 A/V et est identique à ce texte.

6. propagation dans l'axe des vallées;

7. propagation par le travers des vallées;

8. propagation dans des zones urbaines;

9. problèmes relatifs à l'influence du terrain au-dessus duquel passent les ondes, sur la polarisation de ces ondes;

10. variation de la phase en fonction de la distance sur un terrain irrégulier;

11. influence d'une région montagneuse de grande superficie située au-dessous du volume commun des faisceaux des antennes d'émission et de réception dans la propagation par diffusion dans la troposphère;

12. conditions nécessaires pour qu'il y ait gain d'obstacle, notamment lorsque le niveau du signal reçu le long d'un trajet montagneux est plus élevé que celui qui serait reçu s'il était transmis au-dessus d'un terrain régulier;

13. influence d'un terrain accidenté tant sur les variations à court terme que sur les variations à long terme de l'affaiblissement de transmission, notamment en présence du gain d'obstacle.

QUESTION 2-1/5

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

Radiométéorologie pour les télécommunications

(1966 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que la propagation des ondes radioélectriques est fonction des conditions thermodynamiques qui règnent dans l'atmosphère et que de nombreuses études ont été faites à ce sujet;

b) que les études de propagation nécessaires à l'établissement d'une liaison radioélectrique de longueur quelconque nécessitent une connaissance statistique du milieu de propagation, c'est-à-dire de l'atmosphère;

c) que, de plus, la structure fine du champ électromagnétique dans le temps et dans l'espace n'est pas assez connue et que le manque de mesures appropriées ne permet pas d'expliquer, dans le détail, les caractéristiques de la propagation des ondes radioélectriques sur la base des théories actuelles,

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 Annexe);

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 devraient être invitées à fournir des données complémentaires concernant l'indice de réfraction et le gradient vertical, afin de compléter les travaux relatifs à la radioclimatologie mondiale décrits dans le Rapport 233-2 (voir Annexe), et à vérifier par des mesures nombreuses, fines et précises, les différentes théories avancées pour expliquer la propagation.

Note 2. — Cette Question, qui tient compte des Recommandations 4 et 5 de la Commission d'aérologie de l'O.M.M., devrait être portée, par le Directeur du C.C.I.R., à la connaissance de l'O.M.M., l'attention de l'O.M.M. étant plus spécialement attirée sur le § 1 de l'Annexe.

ANNEXE

1. On utilisera le coïndice N défini par la formule donnée dans l'Avis 453.

2. Pour les études de radioclimatologie, les mesures thermodynamiques devant conduire au calcul de l'indice de réfraction de l'air et de son gradient vertical devraient, si possible, être obtenues avec une précision au moins égale aux valeurs suivantes:

Température: $\pm 0{,}2°C$
Humidité (mesurée en rapport de mélange): $\pm 0{,}1$ g/kg

Il convient d'employer de préférence un équipement de mesure continue. Les gradients verticaux devraient être calculés pour des intervalles de 100 m compris entre le sol et une hauteur de 2000 m.

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 3/5

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

(1951 – 1953 – 1956 – 1963 – 1966)

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 368-1 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 235-1;

e) qu'il peut être important de tenir compte de ces effets sur des fréquences pouvant descendre jusqu'à 10 kHz 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 231-2,

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 interpréter 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 5-1/5

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION DE TERRE ET SPATIALE

(1953 – 1956 – 1959 – 1966 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que la qualité d'une transmission par faisceau hertzien terrestre, ou par un système de télécommunication spatiale, est conditionnée par les caractéristiques de propagation, en particulier pour les valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence les plus élevées que l'on peut rencontrer;

b) que des brouillages entre différents systèmes peuvent se produire jusqu'à des distances très grandes, en particulier lorsque les valeurs de l'affaiblissement de référence sont faibles,

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 faisceaux hertziens 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 5-1A-1/5

DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE

(1963 – 1966 – 1970)

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;

3. propriétés statistiques des facteurs de propagation qui sont à l'origine des brouillages mutuels entre deux systèmes;

4. influence cumulée des facteurs ci-dessus sur la qualité de fonctionnement globale des faisceaux hertziens à plusieurs sections;

5. 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;

6. données sur la propagation nécessaires pour le choix des emplacements des stations, le dégagement des antennes et leurs caractéristiques de rayonnement;

7. 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 5-1B-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 5-1C-1/5 *

ABSORPTION ET RÉFRACTION TROPOSPHÉRIQUES DANS LES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION SPATIALE

(1963 - 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que certains constituants de la troposphère, notamment la vapeur d'eau, l'oxygène, la pluie, la neige, etc., produisent un affaiblissement des ondes radioélectriques, surtout aux fréquences supérieures à 3 GHz environ et sont aussi à l'origine de bruits émis sur ces fréquences;

b) que la structure de l'indice de réfraction de la troposphère exerce une influence sur la direction de propagation et sur la cohérence du front d'onde;

c) que l'intérêt d'utiliser des fréquences supérieures à 10 GHz peut dépendre de l'emploi de plusieurs installations terminales au sol, espacées de manière telle que ne puissent se poser les problèmes résultant de l'affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages;

d) que les facteurs précités jouent un rôle important dans l'étude technique des systèmes de radiocommunication spatiale,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. mesure et mise au point de méthodes de prévision des distributions de l'atténuation et des durées d'évanouissement des ondes radioélectriques traversant la troposphère, en fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation, de la situation géographique, du temps et des constituants de la troposphère, en y incluant l'oxygène, la vapeur d'eau, les gouttelettes d'eau, la répartition de leurs dimensions et le taux des précipitations, etc.;

2. mesure et mise au point de méthodes de prévision de la réfraction, de la scintillation et de la cohérence du front d'onde pour les ondes radioélectriques traversant la troposphère, en fonction de la fréquence, de l'angle d'élévation, de la situation géographique et du temps;

3. mesure dans laquelle la diversité d'espace ou d'autres techniques peuvent être utilisées pour venir à bout des difficultés résultant de l'affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages;

4. mesure et mise au point des méthodes de prévision du bruit rayonné par les gaz atmosphériques, les nuages et les précipitations.

Note 1. — Afin de répondre aux besoins de la Commission d'études 4, il convient de donner la priorité aux mesures de l'affaiblissement des ondes le long de trajets sous de grands angles de site supérieurs à 5°, en utilisant comme sources des radiobalises montées à bord d'aéronefs ou de satellites ou encore le Soleil. Il y a intérêt, afin de pouvoir extrapoler ces mesures à d'autres régions dans lesquelles on dispose de radars météorologiques, à établir une corrélation entre ces mesures et des données recueillies au même instant par des radars météorologiques fonctionnant sur des fréquences pour lesquelles l'affaiblissement est négligeable.

Note 2. — Vu le besoin urgent d'obtenir des données sur l'affaiblissement et les bruits sur les systèmes de radiocommunication spatiale pour la prochaine Conférence administrative mondiale des radiocommunications prévue pour 1971, les administrations sont priées de présenter le plus tôt possible, aux Rapporteurs principaux et aux Vice-Rapporteurs des Commissions d'études 4 et 5 ainsi qu'au Directeur du C.C.I.R., toutes les données sur le sujet mentionné.

---

* On attire l'attention des Groupes de travail intérimaires établis par les Résolutions 2-1 et 3-1 sur les aspects de ce Programme d'études qui se rapportent à leurs mandats.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5-1D-1/5

FACTEURS DE PROPAGATION AFFECTANT LE PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES RADIOÉLECTRIQUES ENTRE LES SYSTÈMES SPATIAUX ET LES SYSTÈMES DE FAISCEAUX HERTZIENS

(1963 – 1966 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que, d'après la Recommandation N° 1A de la Conférence administrative extraordinaire des radiocommunications, Genève, 1963, il convient de calculer une distance de coordination pour les stations terriennes dans les bandes de fréquences partagées entre le service spatial et les services fixe et mobile;

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) que les fréquences qui présentent de l'intérêt sont généralement supérieures à 1 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 mécanismes de propagation troposphérique connus, y compris la diffusion provoquée par les précipitations, 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) de 25 à 500 km de longueur, 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;

---

* 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 sur 4 et 6 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 391-1.

Note. — Les résultats à fournir dans le cadre de ce Programme d'études, notamment au titre du § 5, sont requis d'urgence par les administrations et par l'I.F.R.B.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5-1E-1/5

INFLUENCE DE LA DIFFUSION PROVOQUÉE PAR LES PRÉCIPITATIONS SUR LE CHOIX DES EMPLACEMENTS DES STATIONS TERRIENNES

(1966 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que la pluie, la grêle, la neige, ainsi que certaines non-homogénéités 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,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination du domaine angulaire dans lequel la diffusion provoquée par les précipitations et par certaines hétérogénéités de l'atmosphère peut être considérée comme uniforme et, en général, de la relation entre ce domaine angulaire et l'angle de diffusion, 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 faisceaux des antennes de faisceaux hertziens et de stations terriennes ne se coupent pas.

Note. — Pour répondre aux besoins des Commissions d'études 4 et 9, il convient de donner la priorité aux mesures qui permettront de définir le niveau des champs brouilleurs sur 4 GHz et sur 6 GHz, avec des types d'antennes et de trajets semblables à ceux que l'on rencontre dans la pratique.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5-1F-1/5 *

FACTEUR D'ÉCRAN DU TERRAIN A UTILISER POUR LE CALCUL DE LA DISTANCE DE COORDINATION

(1965 – 1966 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que, dans certains cas, le calcul de la distance de coordination peut faire intervenir un facteur d'écran du terrain ou un facteur de gain d'obstacle qui tiennent compte des effets du relief au voisinage de la station terrienne,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes:

1. détermination des circonstances dans lesquelles on peut tenir compte d'un facteur d'écran du terrain ou d'un facteur de gain d'obstacle lors du calcul de la distance de coordination;

2. détermination, pour le facteur d'écran du terrain, de valeurs appropriées pour le calcul des distances de coordination;

3. influence de la forme d'un obstacle, et du nombre des obstacles;

4. influence de la longueur du trajet, notamment lorsqu'il s'agit de distances de quelques centaines de kilomètres, sur la valeur du facteur d'écran ou du gain d'obstacle, pour un obstacle donné situé au voisinage d'une station terrienne;

---

* Ce Programme d'études a été rédigé en tenant compte de la Question 14-1/4 et l'attention des administrations est attirée sur ce Programme d'études et sur le Doc. IV/93 (Japon), 1963-1966, dans l'espoir qu'elles voudront bien fournir le plus grand nombre possible de renseignements de cette nature avant la prochaine Assemblée plénière du C.C.I.R.

5. méthodes de calcul des facteurs d'écran du terrain pour les obstacles situés à moins de 5 km de la station terrienne.

Note. — Les résultats à fournir dans le cadre de ce Programme d'études, notamment au titre du § 5, sont requis d'urgence par les administrations et par l'I.F.R.B. Le Rapport 427 contient une réponse partielle à ce Programme d'études.

PROGRAMME D'ÉTUDES 7A/5

COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 MHz ET 1 GHz

Radiodiffusion et services mobiles

(1963 – 1966)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que les courbes de propagation provisoires indiquées dans l'Avis 370-1 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 jusqu'à 30 000 m,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'effectuer les études suivantes *:

1. enregistrements continus des champs 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 corrections à apporter aux courbes de l'Avis 370-1 pour tenir compte des effets exercés par d'autres conditions de climat, de terrain et de végétation. On étudiera également l'influence des bâtiments sur la réception à faible hauteur;

3. études, sur des trajets pouvant atteindre environ 2000 km de longueur, des effets dus à la variation de hauteur des antennes d'émission ou de réception, compte tenu du fait que le service de radiodiffusion et le service mobile terrestre peuvent être amenés à utiliser des antennes d'émission dont la hauteur peut varier entre 9 et 1200 m, et des antennes de réception dont la hauteur peut varier entre 2 et 150 m au-dessus du sol, tandis que le service mobile aéronautique est susceptible d'utiliser des antennes jusqu'à des hauteurs de l'ordre de 30 000 m au-dessus du sol;

Note. — Une attention particulière devrait être accordée aux besoins immédiats du service mobile aéronautique, dans la bande de fréquences comprise entre 100 et 140 MHz.

---

* Un grand nombre de ces études sont étroitement liées au Programme d'études 5-1D-1/5.

4. étude particulière des problèmes posés par des trajets maritimes et les trajets mixtes terrestres et maritimes;

5. études, pour diverses valeurs de la distance de transmission entre des points de la surface terrestre, 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 311-1, afin d'étendre le champ d'application des courbes contenues dans l'Avis 370-1.

QUESTION 8/5

DONNÉES DE PROPAGATION POUR LA RADIODIFFUSION SONORE ET LA TÉLÉVISION DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz

(1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que la radiodiffusion sonore et la télévision utiliseront un jour les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz;

b) que les phénomènes de propagation dans ces bandes auront une influence décisive sur la planification des réseaux de radiodiffusion,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les valeurs de champ dépassées pendant 99%, 90%, 50%, 10% et 1% du temps dans les diverses bandes à considérer au-dessus de 10 GHz * et comment ces valeurs dépendent-elles de la distance, de la hauteur de l'antenne d'émission, de la nature du terrain et des conditions climatiques;

2. quelle est la distribution locale du champ ou de l'affaiblissement de transmission, surtout dans les grandes villes, et quel est l'effet des obstacles tels que les bâtiments élevés sur la zone desservie par les stations?

---

* Actuellement, la bande de 11,7 à 12,7 GHz présente un intérêt particulier.

QUESTION 9/5 *

CONSIDÉRATIONS RELATIVES A LA PROPAGATION QUI AFFECTENT LES SERVICES MOBILES UTILISANT LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION OU DE RADIOREPÉRAGE PAR SATELLITE

(1969 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

que certaines administrations étudient la réalisation de systèmes à satellite en vue d'assurer la sécurité, le radiorepérage, les télécommunications et le contrôle en matière de transport aérien et maritime,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ qu'il y a lieu d'étudier la question suivante, pour autant qu'elle concerne les aéronefs et les navires:

1. quels sont les facteurs de propagation qui affectent le choix des fréquences pour ces systèmes, compte tenu du cas où le satellite est voisin de l'horizon;

2. quels sont les caractéristiques et les effets de la réflexion sur la surface de la Terre et de la mer et des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples sur les signaux de télécommunication ou de radiorepérage relayés par des satellites géostationnaires ou non et retransmis à destination des aéronefs et des navires?

RÉSOLUTION 2-1

DONNÉES RELATIVES A LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE POUR LA RADIODIFFUSION, LES TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET LES LIAISONS ENTRE POINTS FIXES

(1963 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que les courbes relatives à la radiodiffusion et aux services mobiles, figurant en annexe à l'Avis 370-1, doivent être tenues à jour, à la lumière des données expérimentales nouvelles;

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, y compris les systèmes de télécommunication spatiale et de Terre (voir le Programme d'études 5-1D-1/5);

---

* L'attention de la Commission d'études 5 est appelée sur la Question 19-1/8 et sur le Programme d'études 19-1A-1/8 de la Commission d'études 8, ainsi que sur les documents pertinents de la Commission d'études 6. La présente Question est à signaler à l'attention des Commissions d'études 4 et 8.

c) que l'on reçoit régulièrement de nouvelles données se rapportant aux questions visées sous *a)* et *b)* ci-dessus, surtout à la suite de la demande que le Directeur du C.C.I.R. a formulée dans la Circulaire administrative AC/63,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. qu'un Groupe de travail intérimaire soit créé, afin de poursuivre l'examen de toutes les données disponibles;

2. que ce Groupe soit chargé de proposer toute révision de l'Avis 370-1 qui lui paraîtra souhaitable;

3. que ce Groupe examine les méthodes permettant de déterminer, avec autant d'exactitude et de concision que possible, l'affaiblissement de transmission d'un système de télécommunication entre points fixes, ces méthodes devant être aisément applicables par les ingénieurs des radiocommunications, et qu'il propose d'apporter au Rapport 244-2 les révisions qui lui paraîtront souhaitables;

4. que ce Groupe se compose de membres désignés par les Administrations des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, du Japon, de la République Fédérale d'Allemagne, du Royaume-Uni et de l'U.R.S.S., et que la coordination de ses travaux soit confiée au représentant du Royaume-Uni;

5. que ce Groupe travaille en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire créé en application de la Résolution 3-1;

6. qu'autant que possible, le travail de ce Groupe soit fait par correspondance;

7. que ce Groupe présente les rapports appropriés avant les Assemblées plénières du C.C.I.R.

RÉSOLUTION 3-1

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

(1963 – 1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) qu'il convient de tenir à jour les données présentées dans les Rapports 233-2 et 234-2 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 2-1/5) 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 d'éther (voir le Programme d'études 5-1A-1/5);

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. que soit créé un Groupe de travail intérimaire chargé de 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 soit chargé de proposer toute révision des Rapports 233-2 et 234-2 qui lui apparaîtra souhaitable;

3. que ce Groupe soit composé de membres désignés par les Administrations du Canada, des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, 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 soit confiée au membre désigné par l'Administration française;

4. que ce groupe travaille en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire institué aux termes des dispositions de la Résolution 2-1;

5. que, dans toute la mesure du possible, les travaux du Groupe s'effectuent par correspondance;

6. que ce Groupe établisse un rapport avant la XIII[e] Assemblée plénière du C.C.I.R.

RÉSOLUTION 45

PRÉVISION DE LA PHASE ET DE L'AMPLITUDE DE L'ONDE DE SOL

(1970)

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 1-1/5 et 3/5);

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'il sera créé un Groupe de travail intérimaire 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 aux Rapports 230-1 et 235-1 et à l'Avis 368-1, les révisions et amendements qui lui paraîtront nécessaires;

3. qu'il sera composé de membres désignés par les Administrations des pays suivants: Etats-Unis d'Amérique, Royaume-Uni et Suède;

4. que ses travaux seront coordonnés par le membre désigné par l'Administration du Royaume-Uni;

5. qu'il collaborera, pour l'étude des questions qui les intéressent tous deux, avec le Groupe de travail intérimaire institué aux termes de la Résolution 3-1.

RÉSOLUTION 46

PUBLICATION D'UN ATLAS DES COEFFICIENTS DE RÉFLEXION

(1970)

Le C.C.I.R.,

CONSIDÉRANT

a) que le Secrétariat spécialisé du C.C.I.R. a établi un programme d'ordinateur pour le calcul des coefficients de réflexion de Fresnel d'une onde électromagnétique plane, tant pour la polarisation verticale que pour la polarisation horizontale, et un autre programme pour le calcul des angles de Brewster et des coefficients de réflexion associés;

b) qu'il est nécessaire de connaître ces coefficients de réflexion pour tracer des courbes de propagation, calculer des diagrammes de rayonnement d'antenne, et résoudre un certain nombre de problèmes de caractère pratique,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ

1. que le Directeur du C.C.I.R. publiera un Atlas des coefficients de réflexion de Fresnel qui contiendra:

1.1 une introduction indiquant les formules utilisées dans les calculs, les problèmes qui peuvent être résolus à l'aide de l'Atlas et les restrictions qu'il y a lieu d'imposer à l'emploi de ces coefficients de réflexion dans des cas réels donnés;

1.2 des tables de valeurs de l'angle de Brewster et des coefficients de réflexion associés, pour une onde électromagnétique plane polarisée verticalement;

1.3 des tables de valeurs du coefficient de réflexion de Fresnel pour une onde électromagnétique plane (polarisation verticale et polarisation horizontale);

2. que les tables seront établies avec trois chiffres significatifs en prenant des valeurs appropriées de la conductivité du sol σ et de la constante diélectrique ε dans la gamme de fréquences de 10 kHz à 10 GHz.

IMPRIMÉ EN SUISSE