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

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

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

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

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

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

© International Telecommunication Union

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

# CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

# AVIS ET RAPPORTS DU CCIR, 1978

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

XIV$^{e}$ ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
KYOTO, 1978

## VOLUME V

# PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

Genève, 1978

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

# CCIR

COMITÉ CONSULTATIF
INTERNATIONAL
DES RADIOCOMMUNICATIONS

# AVIS ET RAPPORTS DU CCIR, 1978

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

XIV$^{e}$ ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE
KYOTO, 1978

## VOLUME V

# PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

Genève, 1978

ISBN 92-61-00702-3

## PLAN DES VOLUMES I A XIII
## DE LA XIV[e] ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R.

(Kyoto, 1978)

| | |
|---|---|
| VOLUME I | Utilisation du spectre, contrôle des émissions. |
| VOLUME II | Recherche spatiale et radioastronomie. |
| VOLUME III | Service fixe fonctionnant sur des fréquences inférieures à 30 MHz environ. |
| VOLUME IV | Service fixe utilisant des satellites de télécommunication. |
| VOLUME V | Propagation dans les milieux non ionisés. |
| VOLUME VI | Propagation dans les milieux ionisés. |
| VOLUME VII | Fréquences étalon et signaux horaires. |
| VOLUME VIII | Services mobiles. |
| VOLUME IX | Service fixe utilisant les faisceaux hertziens. Partage des fréquences et coordination entre le service fixe par satellite et les faisceaux hertziens. |
| VOLUME X | Service de radiodiffusion (sonore). |
| VOLUME XI | Service de radiodiffusion (télévision). |
| VOLUME XII | Transmission de signaux de radiodiffusion sonore et de télévision sur une grande distance (CMTT). Vocabulaire (CMV). |
| VOLUME XIII | Renseignements relatifs à la XIV[e] Assemblée plénière:<br>Procès-verbaux des séances plénières.<br>Textes d'intérêt général.<br>Structure du C.C.I.R.<br>Listes des textes émis par le C.C.I.R.<br>Index alphabétique des termes techniques contenus dans les Volumes I à XII. |

© I.T.U.

Printed in U.S.A.

# RÉPARTITION DES TEXTES DE LA XIVe ASSEMBLÉE PLÉNIÈRE DU C.C.I.R. PARMI LES VOLUMES I A XIII

Les Volumes I à XIII, XIVe Assemblée plénière, contiennent tous les textes du C.C.I.R. actuellement en vigueur. Ils se substituent à ceux de l'édition de la XIIIe Assemblée plénière, Genève, 1974.

## 1. Avis, Rapports, Décisions, Résolutions et Vœux

### 1.1 *Indications sur la numérotation de ces textes*

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

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

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

### 1.2 *Avis*

| Numéro | Volume | Numéro | Volume | Numéro | Volume |
|---|---|---|---|---|---|
| 45 | VIII | 341 | I | 457, 458 | VII |
| 48, 49 | X | 342-349 | III | 460 | VII |
| 77 | VIII | 352-354 | IV | 461 | XII (CMV) |
| 80 | X | 355-359 | IX | 463 | IX |
| 100 | I | 361 | VIII | 464-466 | IV |
| 106 | III | 362-365 | II | 467, 468 | X |
| 139, 140 | X | 367 | II | 469-472 | XI |
| 162 | III | 368-370 | V | 473, 474 | XII (CMTT) |
| 182 | I | 371-373 | VI | 475, 476 | VIII |
| 205 | X | 374-376 | VII | 478 | VIII |
| 214-216 | X | 377-379 | I | 479 | II |
| 218, 219 | VIII | 380-393 | IX | 480 | III |
| 239 | I | 395-406 | IX | 481-484 | IV |
| 240 | III | 407-412 | X | 485, 486 | VII |
| 246 | III | 414-416 | X | 487-496 | VIII |
| 257 | VIII | 417, 418 | XI | 497 | IX |
| 265, 266 | XI | 419 | XI | 498, 499 | X |
| 268 | IX | 422, 423 | VIII | 500, 501 | XI |
| 270 | IX | 427, 428 | VIII | 502-505 | XII (CMTT) |
| 275, 276 | IX | 430, 431 | XII (CMV) | 506-508 | I |
| 283 | IX | 433 | I | 509-517 | II |
| 290 | IX | 434, 435 | VI | 518-520 | III |
| 302 | IX | 436 | III | 521-524 | IV |
| 305, 306 | IX | 439 | VIII | 525-530 | V |
| 310, 311 | V | 441 | VIII | 531-534 | VI |
| 313 | VI | 442, 443 | I | 535-538 | VII |
| 314 | II | 444 | IX | 539-554 | VIII |
| 325-329 | I | 445 | I | 555-558 | IX |
| 331, 332 | I | 446 | IV | 559-564 | X |
| 334 | I | 447 | X | 565, 566 | XI |
| 335, 336 | III | 450 | X | 567-572 | XII (CMTT) |
| 337 | I | 452, 453 | V | 573, 574 | XII (CMV) |
| 338, 339 | III | 454-456 | III | | |

1.3 *Rapports*

| Numéro | Volume | Numéro | Volume | Numéro | Volume |
|---|---|---|---|---|---|
| 19 | III | 322 | VI (1) | 493 | XII (CMTT) |
| 32 | X | 324-326 | I | 496-498 | XII (CMTT) |
| 93 | VIII | 327 | III | 499-502 | VIII |
| 106, 107 | III | 329 | III | 504-507 | VIII |
| 109 | III | 336 | V | 509-512 | VIII |
| 111 | III | 338 | V | 516 | X |
| 112 | I | 340 | VI (1) | 518 | VII |
| 122 | XI | 342 | VI | 519-528 | I |
| 130 | IX | 345 | III | 530-534 | I |
| 137 | IX | 347 | III | 535-546 | II |
| 176, 177 | III | 349 | III | 548 | II |
| 179 | I | 352-357 | III | 549-551 | III |
| 181 | I | 358 | VIII | 552-561 | IV |
| 183 | III | 362-364 | VII | 562-565 | V |
| 184 | I | 367-373 | I | 567 | V |
| 186 | I | 374-380 | IX | 569 | V |
| 195 | III | 382 | IX | 571 | VI |
| 196 | I | 383-385 | IV | 574, 575 | VI |
| 197 | III | 386-388 | IX | 576-580 | VII |
| 200, 201 | III | 390, 391 | IV | 581, 582 | VIII |
| 203 | III | 393 | IX | 584-591 | VIII |
| 204-208 | IV | 394 | VIII | 594-596 | VIII |
| 209 | IX | 395, 396 | II | 598, 599 | VIII |
| 212 | IV | 400, 401 | X | 602 | VIII |
| 214 | IV | 404, 405 | XI | 604 | IX |
| 215 | XI | 409 | XI | 607-610 | IX |
| 222-224 | II | 411, 412 | XII (CMTT) | 612-615 | IX |
| 226 | II | 413-415 | I (1) | 616, 617 | X |
| 227-229 | V | 418-420 | I | 619, 620 | X |
| 236 | V | 422, 423 | I | 622 | X |
| 238, 239 | V | 426 | V | 623 | XII (CMTT) |
| 249-251 | VI | 430-432 | VI | 624-634 | XI |
| 252 | VI (1) | 434-437 | III | 635-637 | XII (CMTT) |
| 253-255 | VI | 439 | VII | 639, 640 | XII (CMTT) |
| 258-260 | VI | 443-446 | IX | 642, 643 | XII (CMTT) |
| 262, 263 | VI | 448, 449 | IX | 646-649 | XII (CMTT) |
| 265, 266 | VI | 451 | IV | 651-671 | I |
| 267 | VII | 453-455 | IV | 672-700 | II |
| 270, 271 | VII | 456 | II | 701-705 | III |
| 272, 273 | I | 457, 458 | X | 706-713 | IV |
| 275-282 | I | 461 | X | 714-724 | V |
| 283-289 | IX | 463-465 | X | 725-729 | VI |
| 292, 293 | X | 468 | X | 730-738 | VII |
| 294 | XI | 469 | XI | 739-778 | VIII |
| 299-305 | X | 472 | X | 779-793 | IX |
| 306 | XI | 473 | XI | 794-800 | X |
| 311-313 | XI | 476-478 | XI | 801-814 | XI |
| 314 | XII (CMTT) | 481-485 | XI | 815-823 | XII (CMTT) |
| 315 | XI | 487, 488 | XII (CMTT) | | |
| 319 | VIII | 491 | XII (CMTT) | | |

(1) Publiés séparément.

1.3.1 *Note au sujet des Rapports*

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

1.4 *Décisions*

| Numéro | Volume | Numéro | Volume | Numéro | Volume |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | IV | 18 | XII (CMTT) | 28, 29 | VII |
| 3-5 | V | 19 | XII (CMV) | 30-32 | VIII |
| 6-11 | VI | 21-24 | VI | 33 | XI |
| 17 | XI | 27 | I | | |

1.4.1 *Note au sujet des Décisions*

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

1.5 *Résolutions*

| Numéro | Volume | Numéro | Volume | Numéro | Volume |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | VI | 33 | XIII | 65 | XI |
| 14 | VII | 39 | XIII | 66 | XII (CMV) |
| 15 | I | 44 | I | 67-70 | XIII |
| 20 | VIII | 61 | XIII | | |
| 23 | XII (CMV) | 62 | I | | |
| 24 | XIII | 63 | VI | | |
| 26, 27 | XIII | 64 | X | | |

1.6 *Vœux*

| Numéro | Volume | Numéro | Volume | Numéro | Volume |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | I | 34, 35 | I | 55 | XII (CMTT) |
| 11 | I | 38 | XI | 56 | IV |
| 13, 14 | IX | 40 | XI | 57 | VIII |
| 15, 16 | X | 41 | XII (CMTT) | 58, 59 | X |
| 22, 23 | VI | 42, 43 | VIII | 60 | XI |
| 24 | VIII | 45, 46 | VI | 61-63 | XIII |
| 26-28 | VII | 49 | VIII | | |
| 29 | I | 50 | IX | | |
| 32 | I | 51 | X | | |

## 2. Questions et Programmes d'études

2.1 *Indications sur la numérotation de ces textes*

2.1.1 *Questions*

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

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

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

2.1.2 *Programmes d'études*

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

Exemples:

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

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

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

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

2.2 *Emplacement des Questions et Programmes d'études*

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

# VOLUME V

## PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

(Commission d'études 5)

## TABLE DES MATIÈRES


| | | Page |
|---|---|---|
| Plan des Volumes I à XIII de la XIV[e] Assemblée plénière du CCIR | | II |
| Répartition des textes de la XIV[e] Assemblée plénière du CCIR parmi les Volumes I à XIII | | III |
| Table des matières | | VI |
| Index des textes par ordre numérique | | IX |
| Index des textes publiés dans d'autres Volumes, mais présentant aussi de l'intêret pour l'étude de la propagation dans les milieux non ionisés | | X |
| Mandat de la Commission d'études 5 et Introduction par le Rapporteur principal de la Commission d'études 5 | | XI |
| *Section 5A: Textes d'intérêt général* | | |
| Introduction aux textes de la Commission d'études 5 | | 1 |
| Avis 525 | Calcul de la propagation en espace libre | 4 |
| Avis 311-3 | Mode de présentation des données obtenues au cours de l'étude de la propagation troposphérique | 9 |
| Rapport 227-2 | Méthodes générales de mesure du champ et des paramètres qui s'y rapportent | 11 |
| *Section 5B: Effets du sol* | | |
| Avis 368-3 | Courbes de propagation pour l'onde de sol aux fréquences comprises entre 10 kHz et 30 MHz | 17 |
| Rapport 714 | Propagation de l'onde de sol dans une atmosphère exponentielle | 35 |
| Avis 526 | Propagation par diffraction | 37 |
| Rapport 715 | Propagation par diffraction | 37 |
| Avis 527 | Caractéristiques électriques de la surface de la Terre | 48 |
| Rapport 229-3 | Caractéristiques électriques de la surface de la Terre | 50 |
| Rapport 236-4 | Influence des irrégularités de terrain et de la végétation sur la propagation troposphérique | 54 |
| Rapport 336-1 | Réception sur la lune | 59 |
| Rapport 716 | Variations de phase dans la propagation des ondes de sol | 61 |
| Rapport 717 | Atlas mondial de la conductivité du sol | 62 |
| *Section 5C: Effets de l'atmosphère* | | |
| Avis 310-4 | Définitions de termes se rapportant à la propagation dans la troposphère | 69 |
| Avis 369-2 | Atmosphère de référence pour la réfraction | 70 |
| Avis 453 | Formule donnant l'indice de réfraction radioélectrique | 71 |
| Rapport 563-1 | Données radiométéorologiques | 71 |
| Rapport 718 | Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques | 90 |
| Rapport 719 | Affaiblissement par les gaz atmosphériques | 98 |
| Rapport 720 | Emission radioélectrique liée à l'absorption par les gaz atmosphériques et les précipitations | 104 |
| Rapport 721 | Affaiblissement et diffusion par les précipitations et autres particules atmosphériques | 109 |
| Rapport 722 | Transpolarisation due à l'atmosphère | 118 |
| Rapport 723 | Statistiques du mois le plus défavorable | 120 |

Page

*Section 5D: Aspects relatifs à la radiodiffusion et aux services mobiles*

Avis 370-3 Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz. *Services de radiodiffusion* . . . . . 125

Rapport 239-4 Résultats statistiques relatifs à la propagation, pour le service de radiodiffusion dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1000 MHz . . . . . 151

Avis 528 Courbes de propagation sur ondes métriques, décimétriques et centimétriques pour le service mobile aéronautique . . . . . 160

Avis 529 Courbes de propagation des ondes métriques et décimétriques pour le service mobile terrestre . . . . . 167

Rapport 567-1 Méthodes et statistiques permettant d'évaluer le champ pour les services mobiles terrestres fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz . 167

Rapport 228-2 Mesure du champ pour les services de radiodiffusion y compris la télévision sur ondes métriques et décimétriques . . . . . 177

Rapport 562-1 Données de propagation pour la radiodiffusion sonore et la télévision dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz. *Service de radiodiffusion de Terre à 12 GHz* . . . . 185

Rapport 565-1 Données sur la propagation pour la radiodiffusion par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz . . . . . 187

*Section 5E: Aspects relatifs au Service fixe de Terre*

Rapport 338-3 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe . . . . . 189

Avis 530 Données sur la propagation nécessaires pour les faisceaux hertziens transhorizon (diffusion troposphérique) . . . . . 204

Rapport 238-3 Données sur la propagation nécessaires pour les faisceaux hertziens transhorizon . . . . . 204

*Section 5F: Aspects relatifs aux systèmes de télécommunications spatiales*

Rapport 426-2 Méthodes de prévision du bruit radioélectrique et de l'absorption et la réfraction des ondes eu égard aux systèmes de télécommunication spatiale. *Rassemblement des données* 221

Rapport 564-1 Données sur la propagation nécessaires pour les systèmes de télécommunication spatiale 223

*Section 5G: Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages*

Avis 452-2 Données relatives à la propagation pour l'évaluation des brouillages dans les services spatiaux ou dans les services de Terre ou entre eux, et pour le calcul des distances de coordination . . . . . 247

Rapport 569-1 Evaluation des facteurs de propagation liés aux problèmes de brouillage aux fréquences supérieures à 0,6 GHz environ . . . . . 247

Rapport 724 Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation de la distance de coordination dans la gamme de fréquences de 1 à 40 GHz . . . . . 269

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

Question 1-2/5 Influence du sol sur la propagation troposphérique . . . . . 287

Programme d'études 1A-1/5 Effets des accidents de terrain sur la propagation troposphérique . . . 287

Question 2-3/5 Influence de l'atmosphère non ionisée sur la propagation des ondes. *Radiométéorologie pour les télécommunications* . . . . . 288

Question 3-2/5 Effets troposphériques sur les fréquences inférieures à 30 MHz . . . . . 289

Question 5-3/5 Données sur la propagation et sur le bruit nécessaires pour les systèmes de télécommunication de Terre et spatiale . . . . . 289

Programme d'études 5A-3/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens à visibilité directe . . . . . 289

Programme d'études 5B-1/5 Données sur la propagation nécessaires aux faisceaux hertziens transhorizon . . . . . 290

Programme d'études 5C-3/5 Données sur la propagation et sur le bruit nécessaires aux systèmes de radiocommunication spatiale . . . . . 291

Programme d'études 5D-3/5 Facteurs de propagation affectant le partage des bandes de fréquences et la réutilisation des fréquences sur des trajets terrestres . 292

Programme d'études 5E-3/5 Rôle joué par la diffusion provoquée par les précipitations dans les brouillages entre systèmes de Terre et systèmes spatiaux . . . . . 293

Page

Question 7-1/5 Courbes de propagation et données sur la propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour le service de radiodiffusion, les services mobiles et le service de radiorepérage. *Radiocommunications de Terre et radiocommunications spatiales* . . . . . 293

Programme d'études 7B-1/5 Données de propagation nécessaires pour la radiodiffusion (y compris la radiodiffusion par satellite) dans les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz . . . . . 294

Programme d'études 7C/5 Questions de propagation présentant de l'importance pour les services mobiles utilisant des systèmes de télécommunication ou de radiorepérage par satellite . . . . . 295

Programme d'études 7D/5 Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz pour le service de radiodiffusion . . . . . 295

Programme d'études 7E-1/5 Données sur la propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour le service mobile terrestre . . . . . 296

Programme d'études 7F-1/5 Données sur la propagation aux fréquences supérieures à 30 MHz pour les services mobiles aéronautique et maritime et pour le service de radiorepérage . . . . . 296

Programme d'études 8A/5 Caractéristiques de la propagation des ondes électromagnétiques dans la région la plus élevée du spectre des fréquences radioélectriques, ainsi que dans l'infrarouge et la lumière visible . . . . . 297

Décision 3-2 Prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol . . . . . 297

Décision 4-1 Données relatives à la propagation troposphérique pour la radiodiffusion, les télécommunications spatiales et les liaisons entre points fixes . . . . . 298

Décision 5-2 Influence des régions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes . . . . . 298

# INDEX DES TEXTES PAR ORDRE NUMÉRIQUE


| | | Page |
|---|---|---|
| SECTION 5A : | Textes d'intérêt général | 1 |
| SECTION 5B : | Effets du sol | 17 |
| SECTION 5C : | Effets de l'atmosphère | 69 |
| SECTION 5D : | Aspects relatifs à la radiodiffusion et aux services mobiles | 125 |
| SECTION 5E : | Aspects relatifs au Service fixe de Terre | 189 |
| SECTION 5F : | Aspects relatifs aux télécommunications spatiales | 221 |
| SECTION 5G : | Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages | 247 |

| AVIS | Section | Page |
|---|---|---|
| Avis 310-4 | 5C | 69 |
| Avis 311-3 | 5A | 9 |
| Avis 368-3 | 5B | 17 |
| Avis 369-2 | 5C | 70 |
| Avis 370-3 | 5D | 125 |
| Avis 452-2 | 5G | 247 |
| Avis 453 | 5C | 71 |
| Avis 525 | 5A | 4 |
| Avis 526 | 5B | 37 |
| Avis 527 | 5B | 48 |
| Avis 528 | 5D | 160 |
| Avis 529 | 5D | 167 |
| Avis 530 | 5E | 204 |
| RAPPORTS | | |
| Rapport 227-2 | 5A | 11 |
| Rapport 228-2 | 5D | 177 |
| Rapport 229-3 | 5B | 50 |
| Rapport 236-4 | 5B | 54 |
| Rapport 238-3 | 5E | 204 |
| Rapport 239-4 | 5D | 151 |
| Rapport 336-1 | 5B | 59 |

| RAPPORTS | Section | Page |
|---|---|---|
| Rapport 338-3 | 5E | 189 |
| Rapport 426-2 | 5F | 221 |
| Rapport 562-1 | 5D | 185 |
| Rapport 563-1 | 5C | 71 |
| Rapport 564-1 | 5F | 223 |
| Rapport 565-1 | 5D | 187 |
| Rapport 567-1 | 5D | 167 |
| Rapport 569-1 | 5G | 247 |
| Rapport 714 | 5B | 35 |
| Rapport 715 | 5B | 37 |
| Rapport 716 | 5B | 61 |
| Rapport 717 | 5B | 62 |
| Rapport 718 | 5C | 90 |
| Rapport 719 | 5C | 98 |
| Rapport 720 | 5C | 104 |
| Rapport 721 | 5C | 109 |
| Rapport 722 | 5C | 118 |
| Rapport 723 | 5C | 120 |
| Rapport 724 | 5G | 269 |


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

# INDEX DES TEXTES PUBLIÉS DANS D'AUTRES VOLUMES, MAIS PRÉSENTANT UN INTÉRÊT POUR LA COMMISSION D'ÉTUDES 5

| Texte | Titre | Section | Volume |
|---|---|---|---|
| Rapport 657 | Modèle statistique pour la détermination des critères de partage des bandes de fréquences | 1A | I |
| Rapport 456-2 | Bandes de fréquences préférées pour les émetteurs d'engins spatiaux utilisés comme balises | 2B | II |
| Rapport 205-4 | Facteurs affectant le choix des fréquences pour les télécommunications avec les stations spatiales du Service fixe par satellite | 4A | IV |
| Rapport 784 | Effets de la propagation sur la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens en visibilité directe | 9B | IX |
| Rapport 464-2 | Polarisation des émissions de radiodiffusion à modulation de fréquence en ondes métriques (Bande 8) | 10B | X |
| Rapport 306-3 | Rapport signal utile/signal brouilleur pour la télévision en couleur | 11D | XI |
| Rapport 627-1 | Valeur minimale de la puissance surfacique pour établir les plans d'un service de télévision de Terre dans la bande des 12 GHz (Bande VI) | 11D | XI |

# PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

## COMMISSION D'ÉTUDES 5

*Mandat:*

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

— à la surface de la Terre,

— à travers les régions non ionisées de l'atmosphère terrestre,

— dans l'espace où l'effet d'ionisation est négligeable, dans le but d'améliorer les radiocommunications.

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

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

---

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

L'importante rationalisation des textes de la Commission d'études 5 entreprise entre les XII$^{e}$ et XIII$^{e}$ Assemblées plénières s'est poursuivie. Elle visait à faciliter l'emploi de ces textes par les ingénieurs des télécommunications. Immédiatement à la suite du présent rapport du Rapporteur principal, on trouvera une Introduction aux textes de la Commission d'études 5 qui précise la portée des travaux de cette Commission en spécifiant brièvement les différentes catégories de phénomènes de propagation dans les milieux non ionisés susceptibles de poser des problèmes à l'ingénieur qui établit les plans des divers types de systèmes. Comme l'indique l'Introduction, les textes sont classés en sept sections.

Lorsqu'elle a préparé les textes proposés pour adoption à la XIV$^{e}$ Assemblée plénière, la Commission d'études 5 a donné la priorité aux questions liées à la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (CAMR) qui doit se réunir en 1979 et, pour commencer, à celles qui seront traitées au cours de la Réunion spéciale préparatoire (RSP) du C.C.I.R. qui précédera la CAMR en 1978. Les textes des Avis et des Rapports pertinents seront incorporés dans les documents de travail mis à la disposition de la RSP pour lui permettre d'élaborer un Rapport sur des bases techniques à l'intention de la CAMR.

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

Comme par le passé, les travaux de la Commission portent sur des études relatives à la propagation de l'onde de sol au-dessus de terrains non accidentés ainsi que sur les effets produits par les trajets mixtes et les irrégularités — naturelles et artificielles — du terrain. Un programme d'ordinateur a été élaboré en vue de déterminer les caractéristiques de propagation au-dessus de la Terre à des fréquences pouvant aller jusqu'à 10 MHz en tenant compte de la réfraction atmosphérique normale. Un Atlas de courbes de propagation a pu être élaboré au moyen de ce programme; d'autre part, parallèlement à ce travail, un Atlas mondial de la conductivité du sol a aussi été rédigé.

Cependant, l'essentiel des activités de la Commission concerne toujours les effets de la troposphère sur la propagation des ondes au point de vue de la *fiabilité* des systèmes de radiocommunication (de Terre et spatiales) et de leur sensibilité aux effets du *brouillage*. Ce sujet présente une importance particulière pour les travaux de la RSP. Ce travail est tributaire d'études approfondies de radiométéorologie; à cet égard, il y a lieu d'intensifier les études sur la structure et l'intensité des précipitations pluviales dans les divers climats afin de faciliter la planification des services de radiocommunication de Terre et de télécommunication spatiale.

### 2. Groupes de travail intérimaires

La Commission d'études dispose de trois Groupes de travail intérimaires créés respectivement en application de la Décision 3-2 (GTI 5/1), de la Décision 4-1 (GTI 5/2) et de la Décision 5-2 (GTI 5/3). Chacun de ces GTI s'est réuni en 1977 avant la réunion finale de la Commission. Pour l'essentiel, l'activité du GTI 5/1 a consisté à élaborer l'Atlas des conductivités du sol susmentionné tout en donnant une solution à la forme des courbes de propagation de l'onde de sol. Chronologiquement, c'est le GTI 5/3 qui s'est réuni ensuite: il a jeté les bases d'un total remaniement des textes de la Commission sur la radiométéorologie. Enfin, le GTI 5/2 devait surtout se

consacrer à la révision du Rapport 564 « Données sur la propagation nécessaires aux systèmes de télécommunication spatiale ». Mais, compte tenu des observations formulées par les Commissions d'études 4 et 9 à l'occasion de leurs réunions intérimaires de 1976, le GTI 5/2 a aussi procédé à une importante révision du Rapport 569 et élaboré un nouveau texte sur les données de propagation nécessaires à l'évaluation de la distance de coordination. Il convient enfin de signaler que les trois GTI ont aussi travaillé par correspondance et qu'ils continueront de le faire. Il est possible que d'autres réunions soient organisées, mais seulement si elles se révèlent nécessaires pour une bonne coordination des travaux, durant les périodes séparant les réunions de la Commission d'études.

## 3. Contribution aux travaux de la CAMR (1979)

Au cours de la dernière partie de la période d'études, la Commission s'est particulièrement attachée aux problèmes que l'on estimait liés aux bases techniques dont la CAMR pourrait avoir besoin; cette contribution est faite, comme nous l'avons déjà dit, par le canal de la RSP. L'ordre du jour de la CAMR montrant que l'un des principaux problèmes que cette conférence aurait à résoudre est celui du partage des fréquences entre services, en particulier dans le cas des bandes de fréquences où la troposphère exerce de notables effets, la Commission a rédigé ses textes de manière à faciliter au maximum la tâche des ingénieurs qui devront résoudre les problèmes posés par les brouillages et la coordination. En ce domaine, deux nouvelles caractéristiques apparaissent. Premièrement, on procède à une étude des changements de polarisation des ondes dont le trajet de propagation traverse des précipitations, ce qui intéresse en particulier l'application de la polarisation orthogonale que l'on envisage actuellement dans le cadre du partage des fréquences. Deuxièmement, il a été procédé à une évaluation détaillée des paramètres météorologiques qui interviennent dans la détermination du « mois le plus défavorable ».

## 4. Modifications importantes des textes

Le remaniement des textes sur les aspects fondamentaux de la radiométéorologie et l'élaboration de nouveaux Rapports ont entraîné la suppression des Rapports 233-3 et 234-3. Il n'existe pas moins de six nouveaux Rapports sur divers aspects particuliers de ce sujet (Rapports 718, 719, 720, 721, 722 et 723). A cet égard, le Rapport traitant de l'effet de dépolarisation dû à l'atmosphère et le Rapport relatif au « mois le plus défavorable » dans les statistiques de propagation présentent une importance particulière. Il convient aussi d'attirer l'attention sur certains textes profondément remaniés, en particulier sur les Rapports 564-1 et 569-1, qui traitent respectivement de l'affaiblissement sur le trajet oblique dans les liaisons Terre-espace et de l'évaluation des champs de brouillage.

Un nouveau Rapport 724 décrit les données de propagation nécessaires pour la coordination entre services de radiocommunication de Terre et spatiale partageant les mêmes bandes de fréquences.

## 5. Conclusions

Les études menées entre les XIII$^{e}$ et XIV$^{e}$ Assemblées plénières du C.C.I.R. montrent bien la multitude de domaines dans lesquels l'activité de la Commission d'études 5 prend une importance toujours plus grande, facilitant une bonne planification et la saine exploitation de multiples services. Cela s'avère toujours davantage à mesure que se développe l'exploitation des fréquences supérieures à 1 GHz — cette tendance ne pouvant d'ailleurs que s'accentuer. A ces fréquences, où les caractéristiques de propagation sont dominées par l'influence de la troposphère, il faut disposer, dans le monde entier, de données beaucoup plus nombreuses en ce qui concerne les phénomènes météorologiques et de statistiques pertinentes permettant d'établir les caractéristiques de propagation. La nature de ces phénomènes est longuement décrite dans la Section C du présent Volume et toutes les administrations, en particulier celles qui se trouvent dans des régions pour lesquelles les données météorologiques sont encore rares, sont instamment invitées à envoyer des contributions à ce sujet aussi rapidement que possible. Une importance particulière revient aux données statistiques concernant les variations dans l'espace et dans le temps des précipitations pluviales de grande intensité.

Il faut espérer que l'URSI pourra collaborer aux travaux de la Commission d'études 5 en menant des études fondamentales sur les précipitations en sorte que des modèles physiques fondamentaux puissent être élaborés pour le calcul des renseignements nécessaires sur la propagation radioélectrique. L'URSI pourrait encore aider en faisant une évaluation détaillée de l'absorption « anormale » dans la vapeur d'eau, qui s'avère importante aux fréquences supérieures à 100 GHz environ. Cette « absorption anormale » serait, semble-t-il, liée à l'existence d'une association polymérique de molécules d'eau dans la vapeur, en particulier dans les conditions de quasi-saturation.

La Commission d'études 5 apprécie à sa juste valeur la collaboration tout à la fois étroite et croissante qui s'est établie avec les Commissions chargées de l'étude des services; elle serait heureuse que ces dernières lui fournissent des définitions des besoins propres aux divers services afin que, dans ses textes, elle puisse s'attacher à leur donner satisfaction.

SECTION 5A: TEXTES D'INTÉRÊT GÉNÉRAL

*Avis et Rapports*

## INTRODUCTION AUX TEXTES DE LA COMMISSION D'ÉTUDES 5

## PROPAGATION DANS LES MILIEUX NON IONISÉS

### 1. Introduction

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

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

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

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

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

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

Par conséquent, il est avant tout essentiel que l'ingénieur ait une idée réaliste du niveau total, variable, du bruit avec lequel il aura vraisemblablement à compter, ainsi que de ses caractéristiques. En se fondant sur les spécifications d'un système particulier, il lui sera alors possible de définir l'intensité minimale du signal requise pour assurer un service fiable dans des circonstances données. Ceci découle normalement des spécifications du système concernant les valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne doivent pas être dépassées pendant un pourcentage de temps donné, généralement 99,9% ou 99,99% d'une année ou du mois le plus mauvais. Le brouillage total en provenance de quelque source que ce soit ne doit par conséquent pas altérer d'une manière appréciable la qualité de fonctionnement du système pendant un pourcentage de temps plus élevé que le complément à 100%, par exemple 0,1% ou 0,01% respectivement, dans le cas mentionné ci-dessus. Il faut entendre par là que, les signaux désirés et toutes les formes de bruit (autres que le bruit inhérent au système) dépendant de la manière dont les ondes se propagent, il est essentiel de connaître quelle sera, sur le trajet de la liaison, la valeur de l'affaiblissement de transmission qui ne sera pas dépassée pendant, par exemple, 99,9% du temps; de même, il serait essentiel de connaître, pour tous les trajets de bruit connexes, les valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne seraient pas dépassées pendant 0,1% du temps. Il est plus difficile de déterminer ces dernières valeurs que les premières. Considérant, premièrement, l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, deuxièmement, la nécessité d'attribuer des bandes de fréquences en partage à différents services et, troisièmement, la nécessité de répéter l'emploi de la même fréquence à l'intérieur d'un même service, l'utilisation d'une puissance rayonnée excessive pour maintenir la qualité d'un service donné en présence de bruit va à l'encontre du but recherché et ne devrait jamais être envisagée.

## 2. Types de services

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

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

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

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

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

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

## 3. Caractéristiques de la propagation

### 3.1 *Effets dus au terrain*

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

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

A l'exception de la transmission par le sol, dont l'importance est faible, et peut-être de quelques aspects de la transmission sur des trajets mixtes, les caractéristiques électriques du sol jouent un rôle primordial aux fréquences inférieures à 10 MHz * environ. Aux fréquences supérieures à environ 30 MHz, c'est alors la configuration physique du terrain qui compte le plus. Son effet sur l'affaiblissement de transmission global est déterminé par la fréquence utilisée, ainsi que par les caractéristiques électriques en cause et la topographie du terrain. Il convient de noter que, dans le cas de la propagation troposphérique près de la surface terrestre, les irrégularités du terrain jouent toujours un rôle important.

### 3.2 *Effets dus à la troposphère*

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

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

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

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

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

Quand la forme des particules diffusantes n'est pas sphérique, la polarisation de l'onde se modifie. La diffusion par des particules d'eau s'accompagne d'un affaiblissement important de l'onde, tandis que l'affaiblissement causé par des particules de glace est généralement insensible.

---

* Il y a cependant des cas où ces caractéristiques peuvent jouer un certain rôle à des fréquences plus élevées (voir le Rapport 715, facteur *K* et le Rapport 229-3 en général).

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

3.3 *Effets dus à la propagation par trajets multiples*

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

3.4 *Bruits*

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

## 4. Classification des textes

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

Section 5A: Textes d'intérêt général

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

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

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

Section 5E: Aspects relatifs au service fixe de Terre

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

Section 5G: Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages

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

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

TABLEAU I – *Classification des textes*

| | Sujet | Avis | Rapports | Question(1) correspondante | Programme d'études(1) correspondant |
|---|---|---|---|---|---|
| | Introduction du Rapporteur principal | | | | |
| 5A | Textes d'intérêt général | 525<br>311-3 | 227-2 | | |
| 5B | Effets du sol<br>(y compris la propagation de l'onde de sol) | 368-3<br>526<br>527 | 714<br>715<br>229-3<br>236-4<br>336-1<br>716<br>717 | 1-2/5 | 1A-1/5 |
| 5C | Effets de l'atmosphère<br>(radiométéorologie) | 310-4<br>369-2<br>453 | 563-1<br>718<br>719<br>720<br>721<br>722<br>723 | 2-3/5<br>3-2/5 | |
| 5D | Aspects relatifs à la radiodiffusion et aux services mobiles<br>(services de Terre et services par satellite) | 370-3<br>528<br>529 | 239-4<br>567-1<br>228-2<br>562-1<br>565-1 | 7-1/5 | 7B-1/5<br>7C/5<br>7D/5<br>7E-1/5<br>7F-1/5 |
| 5E | Aspects relatifs au service fixe de Terre | 530 | 338-3<br>238-3 | 5-3/5 | 5A-3/5<br>5B-1/5 |
| 5F | Aspects relatifs aux systèmes de télécommunications spatiales<br>(entre points fixes et recherche spatiale) | | 426-2<br>564-1 | 5-3/5 | 5C-3/5 |
| 5G | Facteurs de propagation intervenant dans les brouillages | 452-2 | 724<br>569-1 | 5-3/5 | 5D-3/5<br>5E-3/5 |

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

---

## AVIS 525

## CALCUL DE LA PROPAGATION EN ESPACE LIBRE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que la propagation en espace libre est d'une importance fondamentale pour la technique des radiocommunications,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

qu'il convient d'utiliser les méthodes exposées dans l'Annexe I pour calculer l'affaiblissement en espace libre.

ANNEXE I

## 1. Introduction

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

## 2. Formules fondamentales

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

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

$$E = \frac{\sqrt{30\,P}}{d} \tag{1}$$

$E$ étant le champ

$P$ étant la puissance isotrope rayonnée équivalente

$d$ étant la distance

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

$$E_{\mathrm{mV/m}} = 173\,\frac{\sqrt{P_{\mathrm{kW}}}}{d_{\mathrm{km}}} \tag{2}$$

Ces relations sont représentées par la Fig.1.

La notion de force cymomotrice peut être utilisée en radiodiffusion. On l'obtient en multipliant $E$ et $d$ de l'expression (1). Elle a la dimension d'une tension.

2.2 S'il s'agit d'une liaison entre points fixes, il est préférable de calculer l'affaiblissement en espace libre entre antennes isotropes, appelé aussi affaiblissement de transmission de référence, de la manière suivante:

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

$L_b$ étant l'affaiblissement de transmission de référence en décibels

$d$ étant la distance

$\lambda$ étant la longueur d'onde

$d$ et $\lambda$ étant exprimés avec la même unité.

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

$$L_b = 32{,}45 + 20 \log f_{\mathrm{MHz}} + 20 \log d_{\mathrm{km}} \tag{4}$$

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

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

$$S = \frac{E^2}{120\pi} = \frac{4\pi P_r}{\lambda^2} \tag{5}$$

$S$ étant la puissance surfacique

$E$ étant le champ

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

$\lambda$ étant la longueur d'onde

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

BIBLIOGRAPHIE

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

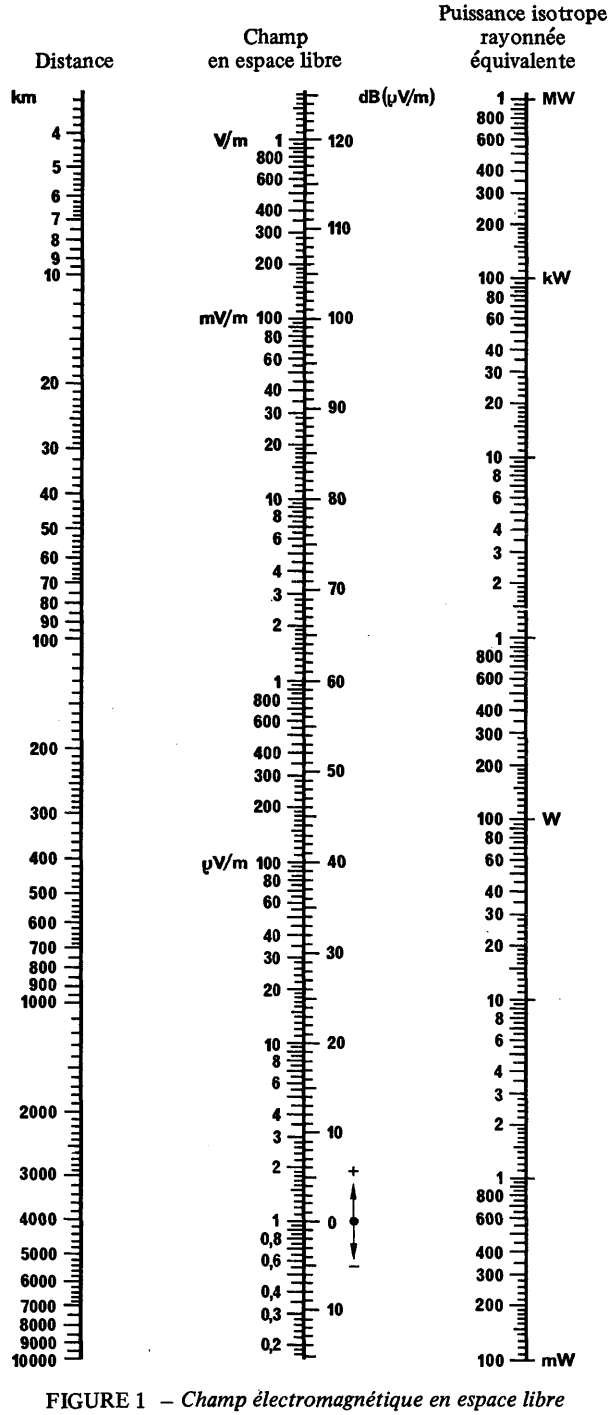



FIGURE 1 – *Champ électromagnétique en espace libre*

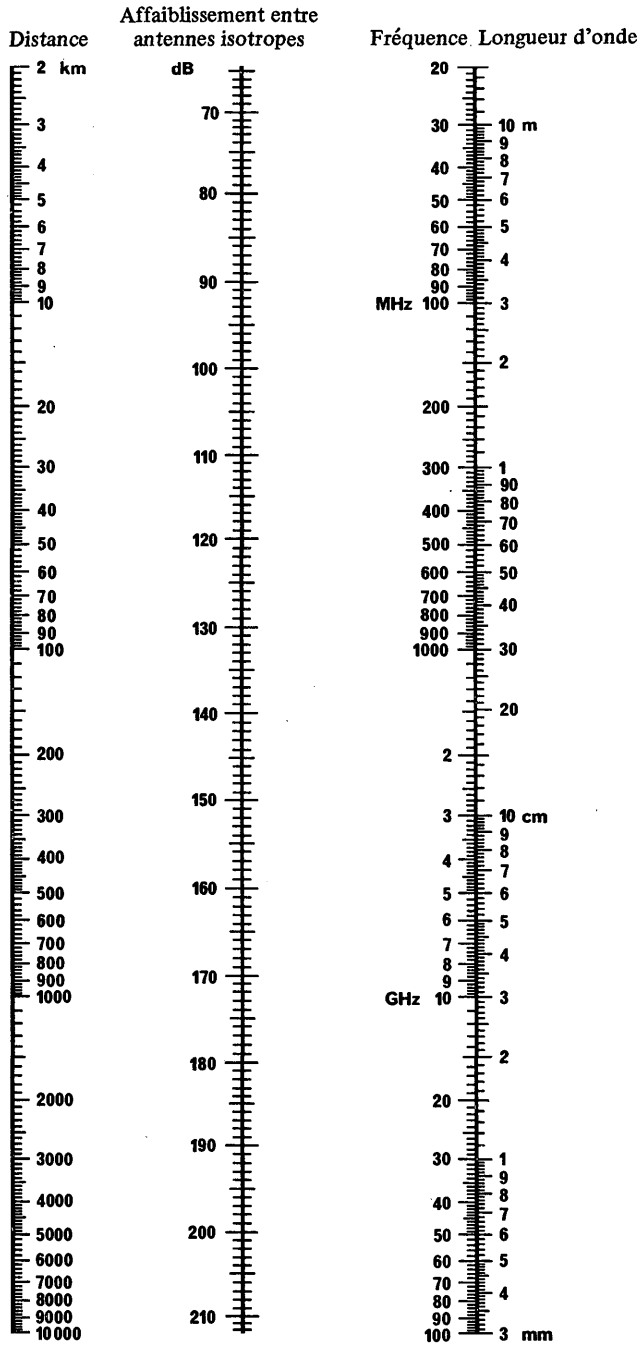



FIGURE 2 – *Affaiblissement de transmission en espace libre entre antennes isotropes*

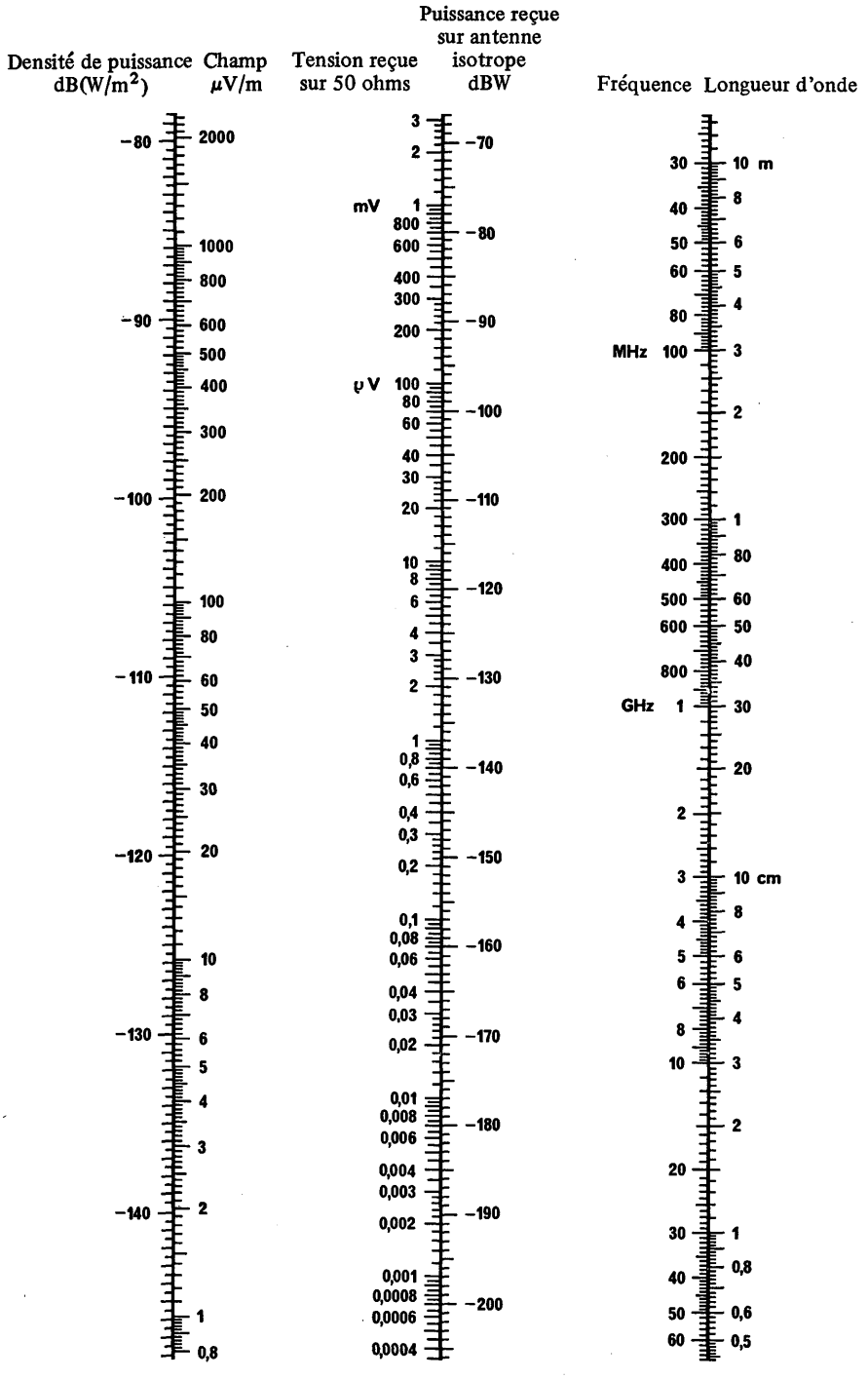



FIGURE 3 – *Caractéristiques d'une onde plane*

AVIS 311-3

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

(1953 - 1956 - 1959 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

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 la propagation,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

**1.** que l'on devrait déterminer les champs ou les affaiblissements de transmission dépassés pendant 0,001%, 0,01%, 0,1%, 1%, 5%, 10%, 50%, 90%, 95%, 99%, 99,9%, 99,99% et 99,999% 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 des services mobiles, on devrait déterminer les valeurs médianes des champs ou de l'affaiblissement de transmission 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;

**4.** qu'il conviendrait de présenter les résultats statistiques des mesures de champ ou de l'affaiblissement de transmission sur du papier spécial pour études de probabilité, étant donné que les distributions log-normales sont celles qui se rencontrent le plus fréquemment dans les données de propagation. * Les valeurs du champ exprimées en dB(μV/m) seraient portées en ordonnées, 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.** qu'il conviendrait de normaliser toutes les valeurs de champ mesurées de telle sorte qu'elles correspondent à celles que l'on obtiendrait avec une source isotrope (plutôt qu'avec des dipôles demi-onde verticaux fréquemment utilisés dans le passé);

**6.** que, dans le cas de la radiodiffusion sonore 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.

*Note.* – Les méthodes de mesure du champ qui se prêtent particulièrement à la radiodiffusion et aux services mobiles sont décrites dans les Rapports 227-2 et 228-2.

## 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) et aussi aux cas caractéristiques de propagation aux distances d'exploitation des liaisons de point à point ou à l'intérieur des zones de service des stations de radiodiffusion ou du service mobile. 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 enregistrements 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

* Sauf dans les cas d'évanouissements rapides qui peuvent exiger des études plus détaillées, selon le type de service, par exemple, pour les transmissions de point à point avec voies de téléphonie avec multiplexage ou voies de données.

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

L'échelle de probabilité gaussienne est définie par:

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

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:

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

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

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

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

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

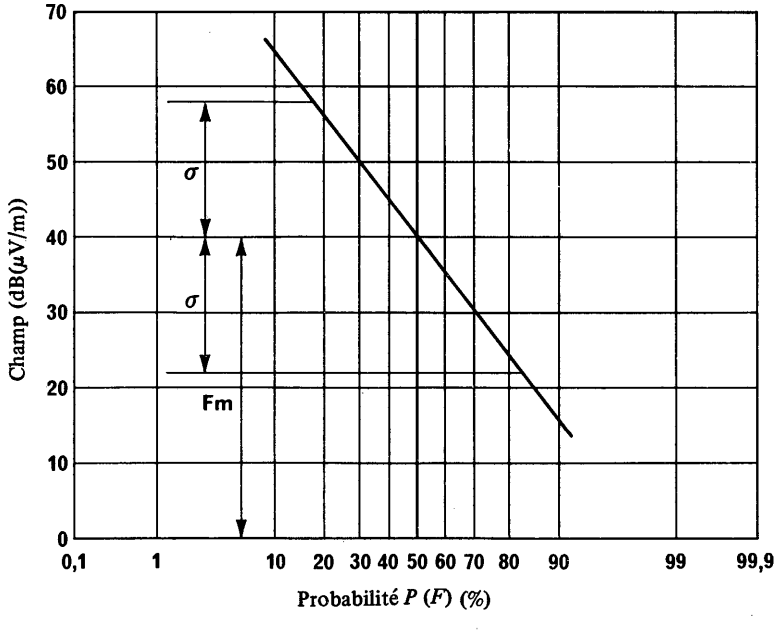



FIGURE 1 – *Graphique montrant une répartition logarithmique normale de mesure de champ*

RAPPORT 227-2 *

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

(Question 7-1/5)

(1959 - 1963 - 1974 - 1978)

## 1. Introduction

Le présent Rapport traite des méthodes générales de mesure du champ et d'autres paramètres qui s'y rapportent, comme la puissance surfacique, la puissance disponible aux bornes de l'antenne de réception ou la puissance rayonnée. Les relations entre ces paramètres sont indiquées dans l'Avis 525.

## 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, on utilise généralement des antennes à cadre ou des antennes fouet. Dans les bandes des ondes métriques et décimétriques, les doublets demi-onde (parfois avec l'adjonction d'éléments supplémentaires) sont d'un usage courant [Chapin, Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949].

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 doublets simples.

Il est cependant très souhaitable de connaître la hauteur équivalente, le gain ou la surface équivalente et les caractéristiques de directivité de l'antenne à la fréquence de fonctionnement.

## 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, 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 228-2.

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

* Ce Rapport est porté à la connaissance de la Commission d'études 1.

dans le diagramme de directivité. Si l'on a à repérer les zéros dans un diagramme de rayonnement, on pourra être amené à prendre des précautions spéciales; en effet, une ligne à haute tension ou une ligne de communication de grande longueur peut conduire de l'énergie jusque dans la région du zéro où l'on effectue les mesures;

4.3 d'une manière générale, on n'a pas à tenir compte des perturbations dues aux câbles souterrains, pour autant que la fréquence soit supérieure à quelques MHz; en revanche, pour les fréquences très inférieures à 2 MHz, des erreurs notables peuvent s'introduire dans les résultats de mesures de champ faites au voisinage de ces câbles, même si ces derniers sont enterrés à une profondeur de quelques mètres. On évitera tout particulièrement les câbles souterrains de très grande longueur (ou les câbles de jonction à des lignes aériennes). Heureusement, les champs perturbateurs sont, le plus souvent, des champs d'induction et il est possible de déterminer l'influence des câbles en faisant des mesures en un certain nombre de points situés à des distances différentes des câbles, pour déterminer le taux d'affaiblissement du champ. Ces câbles peuvent être extrêmement gênants dans les régions où la conductivité du sol est très mauvaise et leurs effets peuvent être encore compliqués par des effets de directivité;

4.4 les caractéristiques du sol peuvent, elles aussi, avoir une grande influence sur les champs à polarisation verticale en ondes métriques et décimétriques. Si l'antenne d'émission et celle du mesureur de champ sont horizontales et placées au voisinage immédiat du sol et que l'on élève l'une d'entre elles, on observe une augmentation quasi linéaire du champ avec la hauteur, jusqu'à un certain maximum, après lequel on a une variation périodique du champ en fonction de la hauteur. Avec les antennes à polarisation verticale, le champ reste sensiblement constant jusqu'à une certaine hauteur au-delà de laquelle il subit des variations périodiques. La gamme de hauteur dans laquelle le champ peut être considéré constant varie sensiblement comme l'inverse de la fréquence et proportionnellement à la constante diélectrique (sauf si la conductivité est élevée comme dans le cas de l'eau de mer). Supposons, par exemple, que l'on ait affaire à un champ polarisé verticalement, à la fréquence de 40 MHz, au-dessous de 5 mètres environ, ce champ est sensiblement indépendant de la hauteur au-dessus d'un sol normal; pourtant, des mesures effectuées au-dessus d'une nappe d'eau douce montrent qu'un tel champ demeure constant jusqu'à une hauteur beaucoup plus grande. On risque de faire de grossières erreurs d'interprétation si l'on néglige de tenir compte de ce phénomène;

4.5 les effets perturbateurs peuvent varier selon les types d'appareils; c'est ainsi que les déplacements de l'opérateur autour du mesureur de champ ont peu d'influence sur les résultats si l'appareil est muni d'une antenne à cadre, mais cette influence peut être importante si l'appareil est muni d'une antenne fouet.

## 5. Effet de polarisation

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

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

## 6. Unités employées dans les mesures

On emploie le plus souvent, dans les mesures de champ, le volt par mètre ou des sous-multiples convenables de cette unité. En toute rigueur, cette unité s'applique uniquement à la composante électrique du champ, mais on l'emploie aussi d'une manière générale pour la mesure de la composante magnétique, en particulier dans le cas des champs rayonnés en espace libre, pour lesquels les énergies des deux composantes sont les mêmes. Pour les fréquences supérieures à 1000 MHz, on peut aussi mesurer la puissance surfacique 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. Dans le cas d'un bruit à large spectre, par exemple un bruit impulsif dont l'énergie est répartie uniformément dans toute la portion considérée du spectre, la tension de crête sera directement proportionnelle à la largeur de bande, ce qui conduit à employer comme unités le microvolt par mètre et par kHz (c'est-à-dire le microvolt par mètre dans une bande large de 1 kHz) ou le watt par mètre carré et par Hz [CISPR; ASA b].

## 7. Notion de l'affaiblissement de transmission

La notion d'affaiblissement de transmission peut être plus utile pour exprimer les résultats des études de propagation pour des systèmes entre points fixes [Norton, 1953 et 1959].

Pour un système donné, l'affaiblissement de transmission se définit comme le rapport, exprimé en décibels, entre la puissance fournie à l'entrée de l'antenne d'émission et la puissance disponible à la sortie de l'antenne de réception.

L'affaiblissement de transmission peut se définir comme l'affaiblissement calculé entre des antennes isotropes. On appelle l'affaiblissement entre antennes isotropes l'«affaiblissement de transmission de référence, $L_b$», et si le milieu dans lequel se situe le trajet entre les antennes d'émission et de réception est l'espace libre, l'affaiblissement de transmission de référence a une valeur supérieure de 4,3 dB à l'affaiblissement de transmission entre des doublets demi-onde, $L_d$.

## 8. Précision des mesures

La précision d'une mesure du champ dépend de la précision avec laquelle on a déterminé la tension en circuit ouvert et la longueur équivalente de l'antenne de réception. La tension en circuit ouvert à l'antenne est égale au produit du champ par la longueur équivalente de l'antenne. Pour un doublet demi-onde, la longueur équivalente est égale à $\lambda/\pi$. Une antenne verticale simple de petite longueur par rapport à un quart de longueur d'onde a une longueur équivalente égale à la moitié de sa longueur réelle.

Lorsque le champ est déduit d'une mesure de la puissance disponible, la résistance de rayonnement de l'antenne influence également la précision de la mesure. De plus, il convient de noter que la résistance de rayonnement et, par suite, la puissance disponible dépendent de la hauteur de l'antenne de réception au-dessus du niveau du sol, alors que sa longueur équivalente, tout au moins en première approximation, est indépendante de sa hauteur au-dessus du sol ou de toute autre influence extérieure. C'est là l'un des avantages qu'il y a, dans certaines applications, à mesurer le champ plutôt que la puissance disponible.

S'il est vrai que la précision avec laquelle on détermine la longueur équivalente et la résistance de rayonnement de l'antenne dépend du type de cette dernière et surtout des influences locales qui s'exercent autour d'elle, dans des conditions favorables, les erreurs sur ces grandeurs devraient être négligeables par rapport à l'erreur faite sur la mesure de la tension en circuit ouvert. Toutefois, cette dernière peut être meilleure que les valeurs indiquées dans le Tableau I ci-après si l'appareillage a été étalonné avec soin.

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 (ou hypsomètres) équipés d'antennes à cadre.

(2) 1 μV/m correspond à $2{,}7 \times 10^{-15}$ W/m$^2$.

## 9. Appareillage

La conception de l'appareillage de mesure de champ devrait permettre de mesurer des champs d'une valeur allant de moins d'un microvolt par mètre à environ 10 volts par mètre. Il est nécessaire d'assurer une protection contre les erreurs de mesure qui peuvent résulter de l'intermodulation à l'intérieur de l'appareillage quand on mesure des champs élevés ou qu'on opère dans un milieu à champ élevé.

On peut améliorer la souplesse du mesureur de champ en utilisant des indicateurs linéaires ou logarithmiques et des transducteurs de sortie, qui permettent de mesurer et d'enregistrer les caractéristiques d'évanouissement des signaux dans un large domaine d'amplitude. La sortie de l'appareil peut être reliée par une jonction appropriée à un enregistreur à bande pour obtenir des enregistrements analogiques. Si c'est la valeur moyenne du signal qui présente le plus d'intérêt, on peut mesurer les moyennes au moyen de totalisateurs de temps à seuils préréglés, de manière à obtenir le temps total de maintien de l'amplitude au-dessus de chaque seuil. Pour des enregistrements de ce type, on peut utiliser des compteurs à moteur ou des compteurs électroniques. Il existe des enregistreurs modernes qui permettent d'échantillonner le signal à une cadence déterminée et d'enregistrer le niveau des échantillons sur une bande magnétique sous forme numérique en vue d'une analyse ultérieure sur ordinateur [Lawson et autres, 1977].

## 10. Etalonnage de l'appareillage

10.1 *Etalonnage du récepteur*

Le mesureur de champ comprend généralement un dispositif qui permet de contrôler l'étalonnage de ses éléments de mesure de la tension aux fréquences radioélectriques. Le dispositif interne d'étalonnage devrait être contrôlé dans un laboratoire dont les normes concordent avec des normes internationales reconnues.

10.2 *Etalonnage global du récepteur et de l'antenne*

Deux méthodes sont largement répandues pour l'étalonnage global d'un récepteur et de son antenne. Aux fréquences inférieures à 20 MHz, on peut utiliser la première qui consiste à étalonner un mesureur de champ à cadre en induisant une tension connue avec précision, provenant d'un deuxième cadre de dimensions connues et dans lequel circule un courant d'intensité connue [Greene, 1951; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose, 1949; Wind]. La seconde méthode, qui convient particulièrement aux fréquences plus élevées, peut s'employer avec des appareils à cadre ou à doublet; elle consiste à effectuer l'étalonnage au moyen d'ondes à polarisation horizontale dont on connaît le champ [McPetrie et Saxton, 1941; Terman et Pettit, 1951; Smith-Rose 1949; Wind]. Ces deux méthodes permettent un étalonnage global du mesureur de champ (y compris l'antenne de réception), dans des conditions analogues à celles que l'on rencontrera vraisemblablement lors de l'utilisation ultérieure de l'appareil.

## 11. Paramètres appropriés aux 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'analyse de la forme d'onde considérée. 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, si l'on veut pouvoir décrire correctement le phénomène.

11.1 *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.

11.2 *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.

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 valeurs de quasi-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 valeurs de quasi-crête s'appliquent également à la mesure des valeurs de crête; le Tableau II au § 11.3 ci-dessous contient des valeurs normalisées de la largeur de bande.

11.3 *Mesure des valeurs de quasi-crête*

La valeur de quasi-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 valeurs de quasi-crête fournit directement une indication sur les effets audibles exercés par des signaux brouilleurs de forme quelconque sur des émissions modulées telles que la téléphonie.

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

TABLEAU II

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

(1) CISPR [CISPR].
(2) ASA [ASA a].
(3) Employées par ces deux organismes.

11.4 *Tension efficace*

La tension efficace [URSI] 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 uniforme, 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. 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.

11.5 *Valeur logarithmique moyenne*

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

11.6 *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. On relève les indications de ces compteurs après écoulement de la période de temps que l'on désire.

Si l'on veut mesurer les variations des valeurs instantanées, on utilise des compteurs 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 [Watt et autres, 1959].

## 12. Caractéristiques à mesurer pour les différentes classes d'émission

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

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.

TABLEAU III

| Classe d'émission | Caractéristiques à mesurer (voir § 11) |
|---|---|
| A0, A2, A3, A4, A9<br>F0, F1, F2, F3, F4, F5, F9(1)<br>A1 (manipulateur abaissé)<br>A5 (synchronisation négative)(2) | Valeur moyenne |
| A1, A3A, A3B, A9A | quasi-crête |
| A5 (synchronisation positive)<br>P0 et autres émissions impulsives | quasi-crête ou crête |

(1) Il faut s'assurer que la largeur de bande du mesureur de champ (ou hypsomètre) 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.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ASA a – Projet de norme américaine pour les appareils de mesure des bruits et des intensités de champ:

ASA C.63.2 0,015 MHz à 30 MHz,
ASA C.63.5 25 MHz à 400 MHz.

ASA b – Projet de norme américaine sur les méthodes de mesure des tensions et des intensités de champ radioélectriques perturbatrices (bruits radioélectriques):

ASA C.63.4 0,015 MHz à 25 MHz,
ASA C.63.3 25 MHz à 400 MHz.

CHAPIN, E. Field strength measurements. FCC Rapport L.D. 6.3.1.

CISPR – Publication 1: Spécifications de l'appareillage de mesure CISPR pour les fréquences comprises entre 0,15 et 30 MHz.

– Publication 2: Spécifications de l'appareillage de mesure CISPR pour les fréquences comprises entre 25 et 300 MHz.

CRICHLOW, W. Q. et SPAULDING, A. D. [20-22 octobre 1958] A graphical method of obtaining amplitude-probability distribution from statistical moments of atmospheric radio noise; exposé présenté à la réunion commune URSI-IRE, Université de l'Etat de Pennsylvanie.

GREENE, F. M. [décembre 1951] Calibration of commercial radio field-strength meters at the National Bureau of Standards. NBS Circular 517.

LAWSON, I. C., STEVENS, A. I. et HARRIS, R. W. [1977], A VHF and UHF semi-automatic field-strength meter. *Telecommunication Journal of Australia.*

McPETRIE, J. S. et SAXTON, J. A. [1941] Theory and experimental confirmation of calibration of field-strength measuring sets by radiation. *Journal IEE*, **88**, Part III, 11.

NORTON, K. A. [janvier 1953] Transmission loss in radio propagation. Part 1 - *Proc. IRE,* **41**.

NORTON, K. A. [juin 1959] Transmission loss in radio propagation. Part II – *NBS Technical Note 12.* Office of technical services. US Department of Commerce, Washington 25, D.C.

SMITH, W. B. [novembre 1945] Recording sky-wave signals from broadcast stations. *Electronics*, **21**, 112.

SMITH-ROSE, R. L. [janvier 1949] Radio field-strength measurements. *Proc. IEE (Radio and Comm.)*, **96**, Part III.

TERMAN, F. E. et PETTIT, J. M. [1951] *Electronic Measurements*, chap. XI. McGraw-Hill.

URSI – *Comptes rendus de la XII^e Assemblée générale*, Boulder, Colorado, Vol. XI, 4^e partie, Commission IV.

– Rapport N° 254: What are the most readily measured characteristics of terrestrial radio noise from which the interference to different types of communication systems can be determined? 9.

– Recommandation N° 1 et Annexe à la Recommandation N° 1: Measurement of atmospheric noise, 99.

WATT, A. D. et autres [juillet 1959] Performance of some radio systems in the presence of thermal and atmospheric noise. *NBS Journ. of Research*, Part B.

WIND, M. *Handbook of Electronic Measurements*, Vol. II, chap. VIII, Polytechnic Institute of Brooklyn, Inter-science Publishers.


## BIBLIOGRAPHIE


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

SECTION 5B: EFFETS DU SOL

*Avis et Rapports*

AVIS 368-3 *

## COURBES DE PROPAGATION POUR L'ONDE DE SOL AUX FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 10 kHz ET 30 MHz

(Question 3-2/5)

Le CCIR, (1951 - 1959 - 1963 - 1970 - 1974 - 1978)

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

**1.** que les courbes ci-jointes (voir Annexes I et II), 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 30 MHz.

### ANNEXE I

### TRAJETS HOMOGÈNES

Les courbes de propagation ci-jointes s'appliquent à des fréquences inférieures à 30 MHz.

Ces courbes appellent les observations ci-après:

**1.** elles ont été établies pour un sol régulier homogène;

**2.** on peut expliquer l'effet de la troposphère en prenant pour hypothèse une atmosphère dans laquelle l'indice de réfraction décroîtrait de façon exponentielle avec la hauteur, ainsi que l'indique l'Avis 369-2;

**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:

- l'émetteur est un doublet électrique vertical idéal de Hertz, auquel une antenne verticale de longueur inférieure au quart d'onde est presque équivalente. Le moment de ce doublet est $5\lambda/\pi\sqrt{3}$ ampères-mètres, donnant un champ de 173,2 mV/m à une distance de 1 km, qui est le champ en espace libre d'une antenne isotrope de 1 kW. Un tel doublet rayonnerait une puissance de 4/3 kW si la Terre était un plan parfaitement conducteur, auquel cas le champ rayonné aurait, à 1 km de distance, une valeur de 346,4 mV/m;

  si l'on veut utiliser ces courbes en se référant au rayonnement d'une antenne unipolaire verticale courte au-dessus d'un sol parfaitement conducteur (champ de 300 mV/m à 1 km), il convient de soustraire 1,25 dB des valeurs données par les courbes;
- les courbes sont obtenues au moyen des méthodes décrites dans le Rapport 714;
- 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 346,4 mV/m à une distance de 1 km;

**5.** l'affaiblissement de propagation défini à l'Avis 341 pour l'onde de sol peut être déterminé d'après les valeurs de champ en dB($\mu$V/m) indiquées par les courbes ci-jointes, en utilisant l'équation (19) du Rapport 112 (Vol. I);

**6.** en règle générale, les courbes ne devraient être utilisées pour déterminer le champ que dans le cas où l'on peut prévoir, avec certitude, une amplitude négligeable des réflexions ionosphériques pour la fréquence en question, par exemple lorsqu'il s'agit de la propagation de jour dans la bande comprise entre 150 kHz et 2 MHz et pour les distances inférieures à 2000 km environ. Toutefois, dans des conditions où le champ de l'onde d'espace est comparable ou supérieur à celui de l'onde de sol, les courbes demeurent applicables lorsque l'effet de l'onde de sol peut être séparé de celui de l'onde d'espace au moyen d'émissions par impulsions, comme c'est le cas pour certains systèmes de radiogoniométrie et d'aide à la navigation. La propagation par ondes ionosphériques est étudiée dans le Vol. VI.

**7.** Ces courbes ont été tracées entièrement à l'aide d'un ordinateur en utilisant le programme GRWAVE décrit au § 3 du Rapport 714. Elles n'ont pas été retouchées. La présentation de ces courbes devra être revue au cours de la présente période d'étude, notamment en ce qui concerne les courtes distances; si l'on considère que certaines modifications sont nécessaires, celles-ci devront être soumises à la XV$^{e}$ Assemblée plénière du CCIR.

---

* Cet Avis doit être porté à l'attention des Commissions d'études 8 et 10.

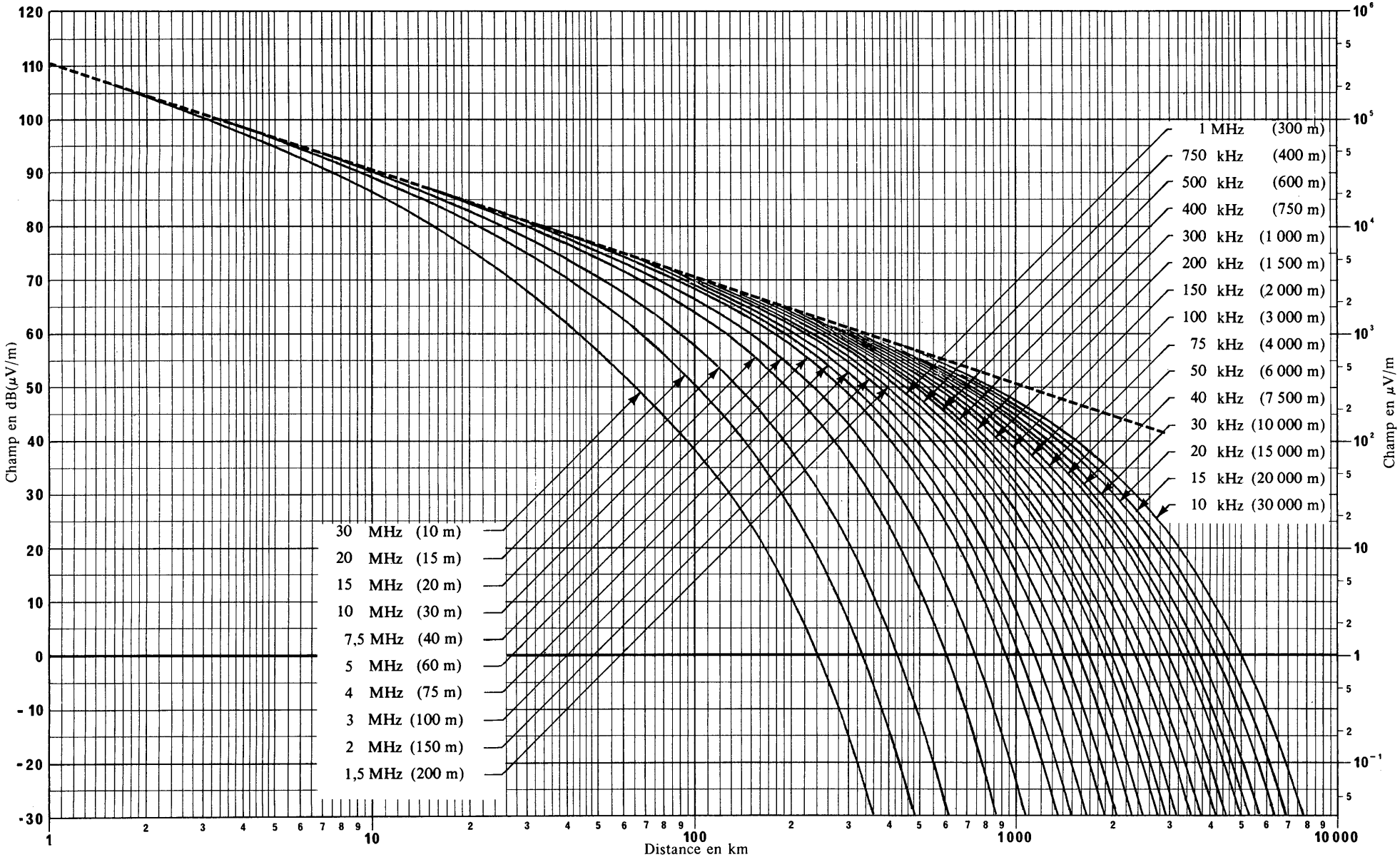



FIGURE 1

*Courbes de propagation de l'onde de sol; Mer, $\sigma = 5$ S/m, $\epsilon = 80$*

▬▬: Inverse de la distance

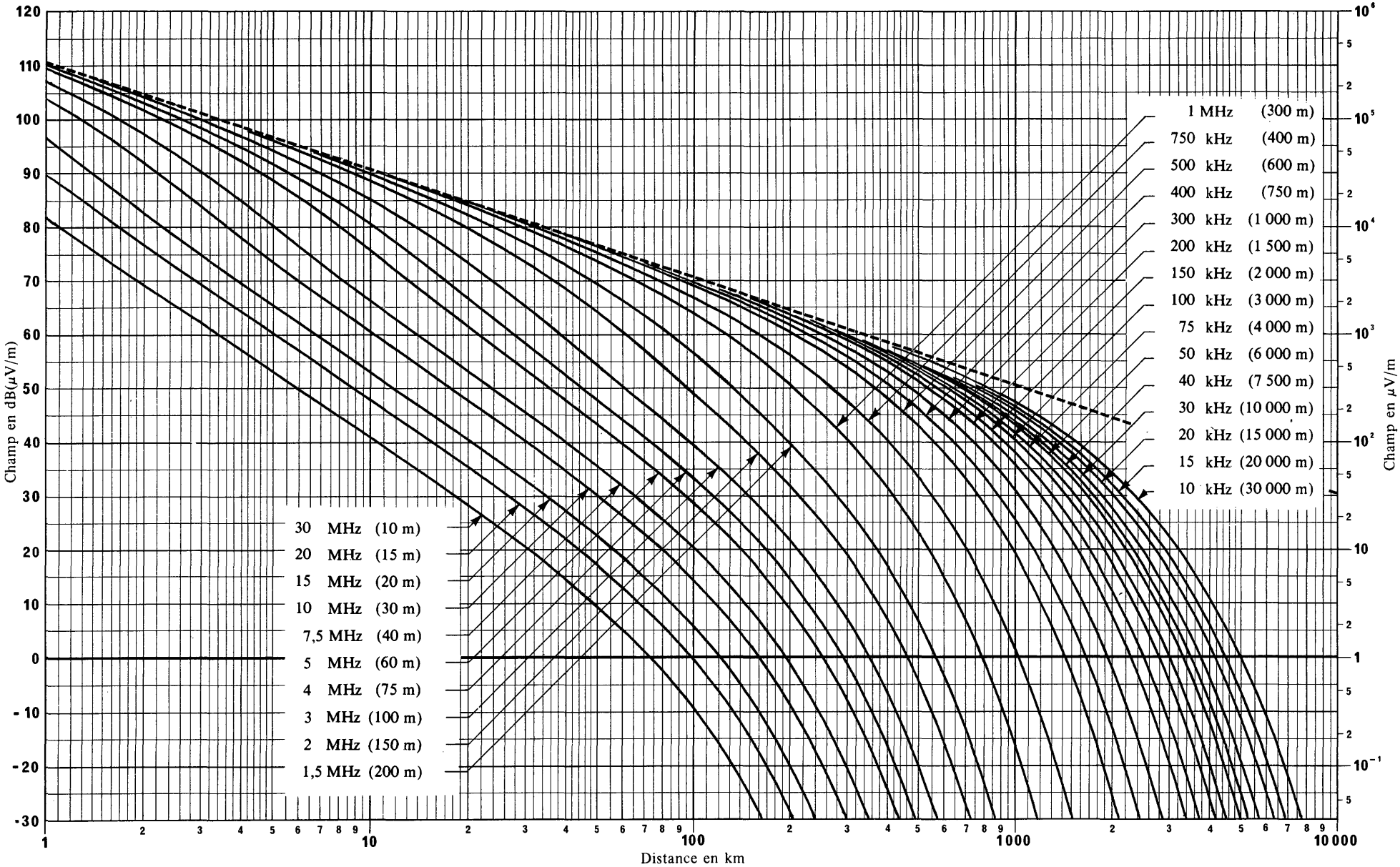



FIGURE 2

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

----; Inverse de la distance

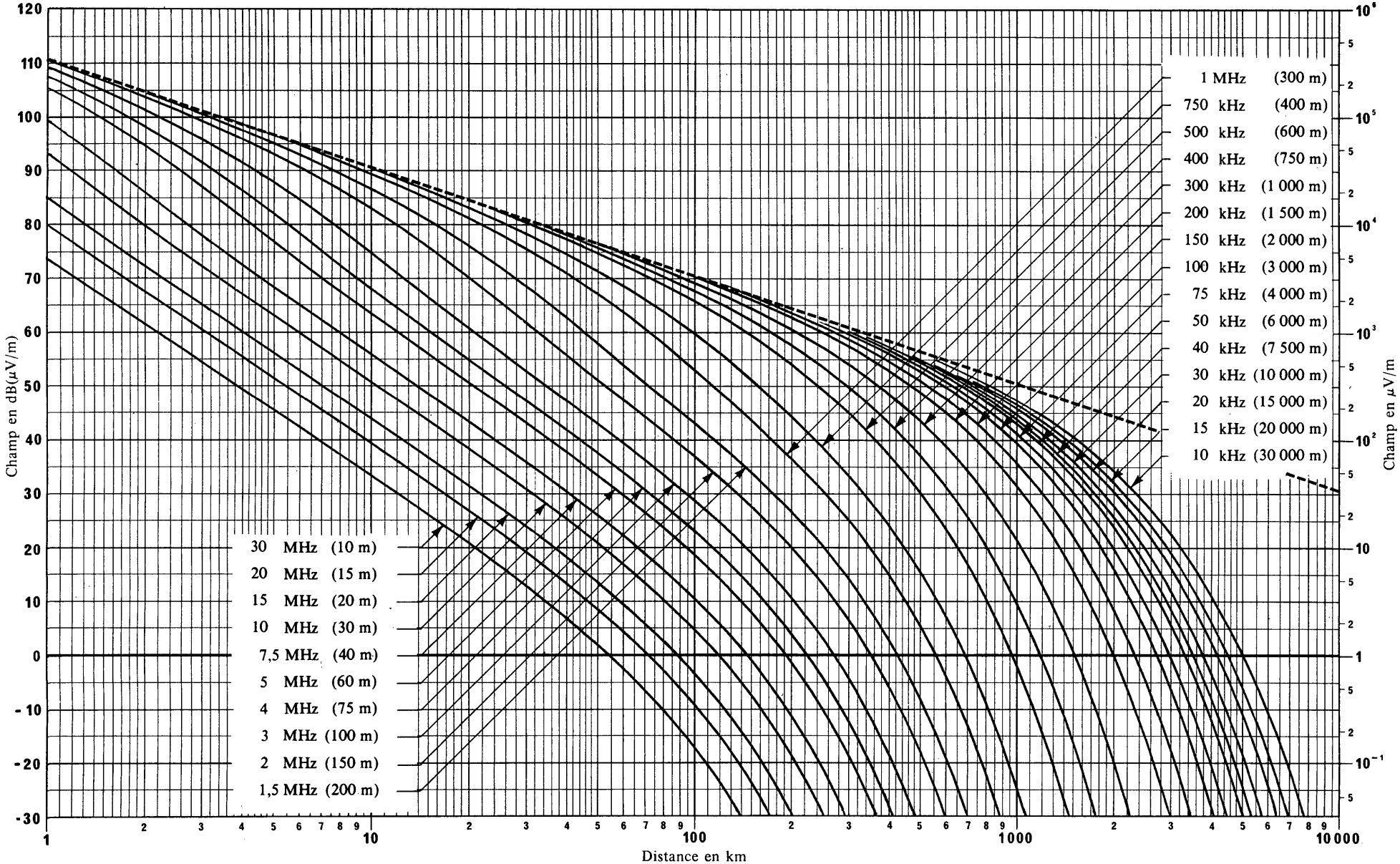



FIGURE 3

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

– – – – : Inverse de la distance

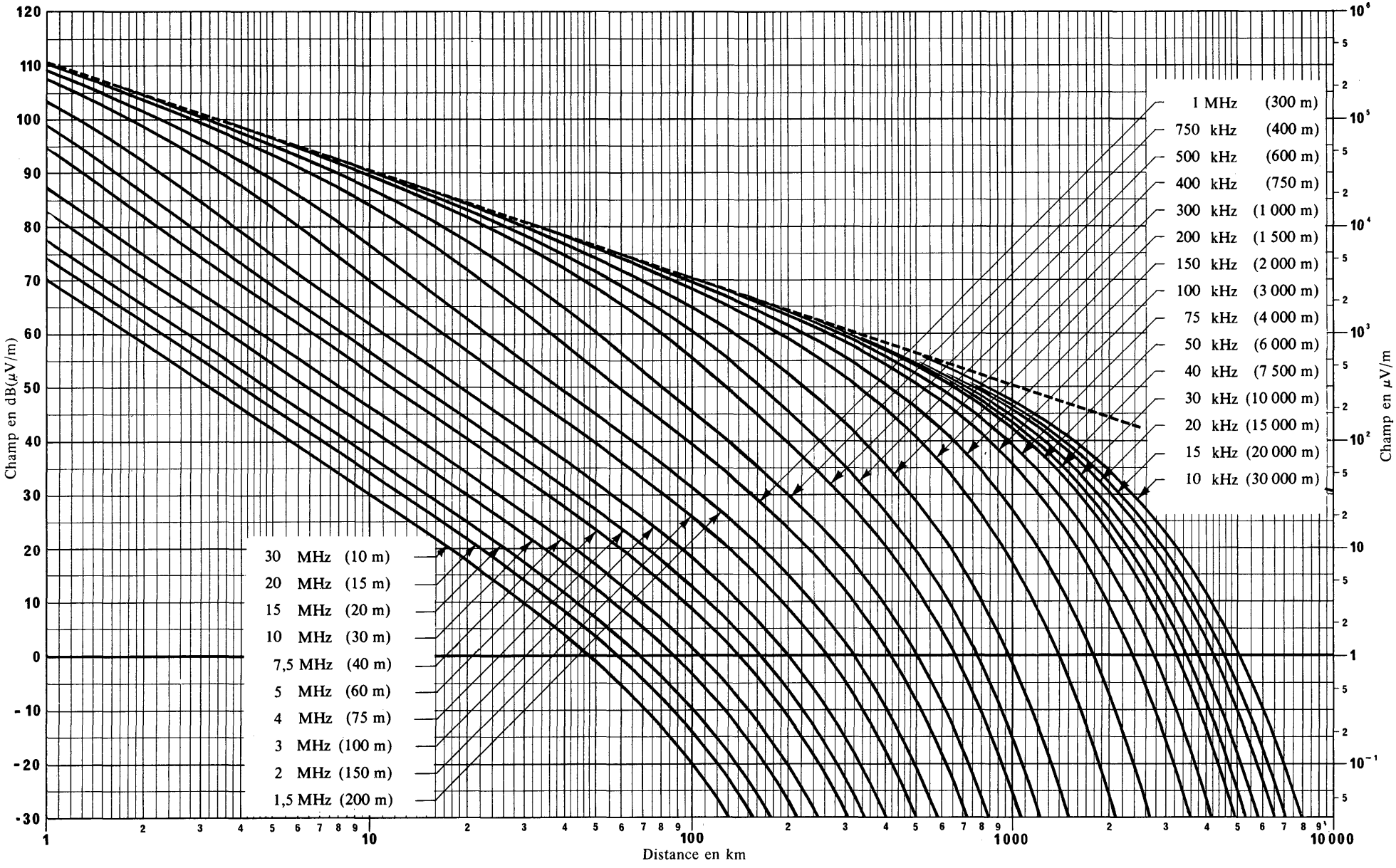



FIGURE 4

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

– – – – : Inverse de la distance

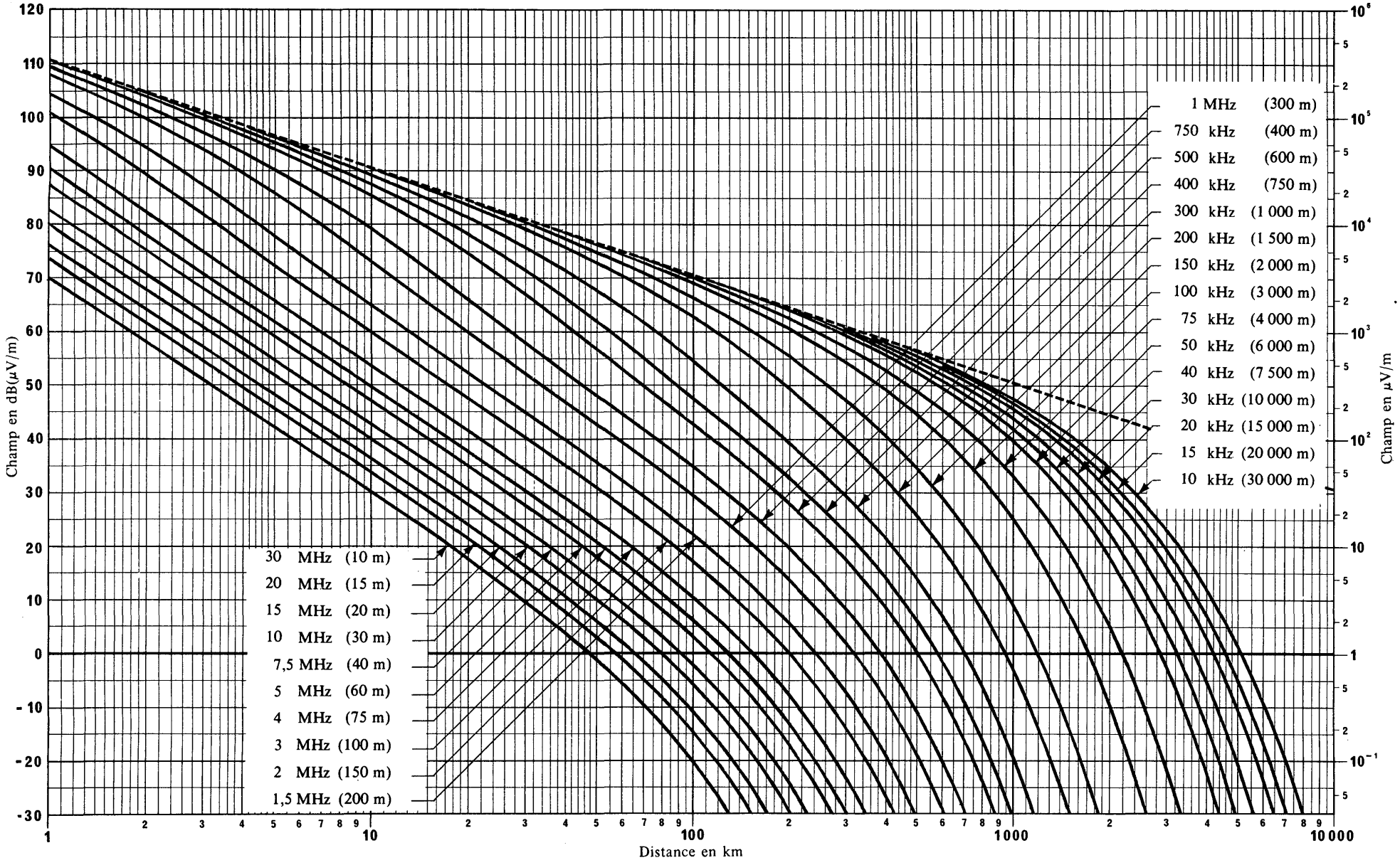



FIGURE 5

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

– – – –: Inverse de la distance

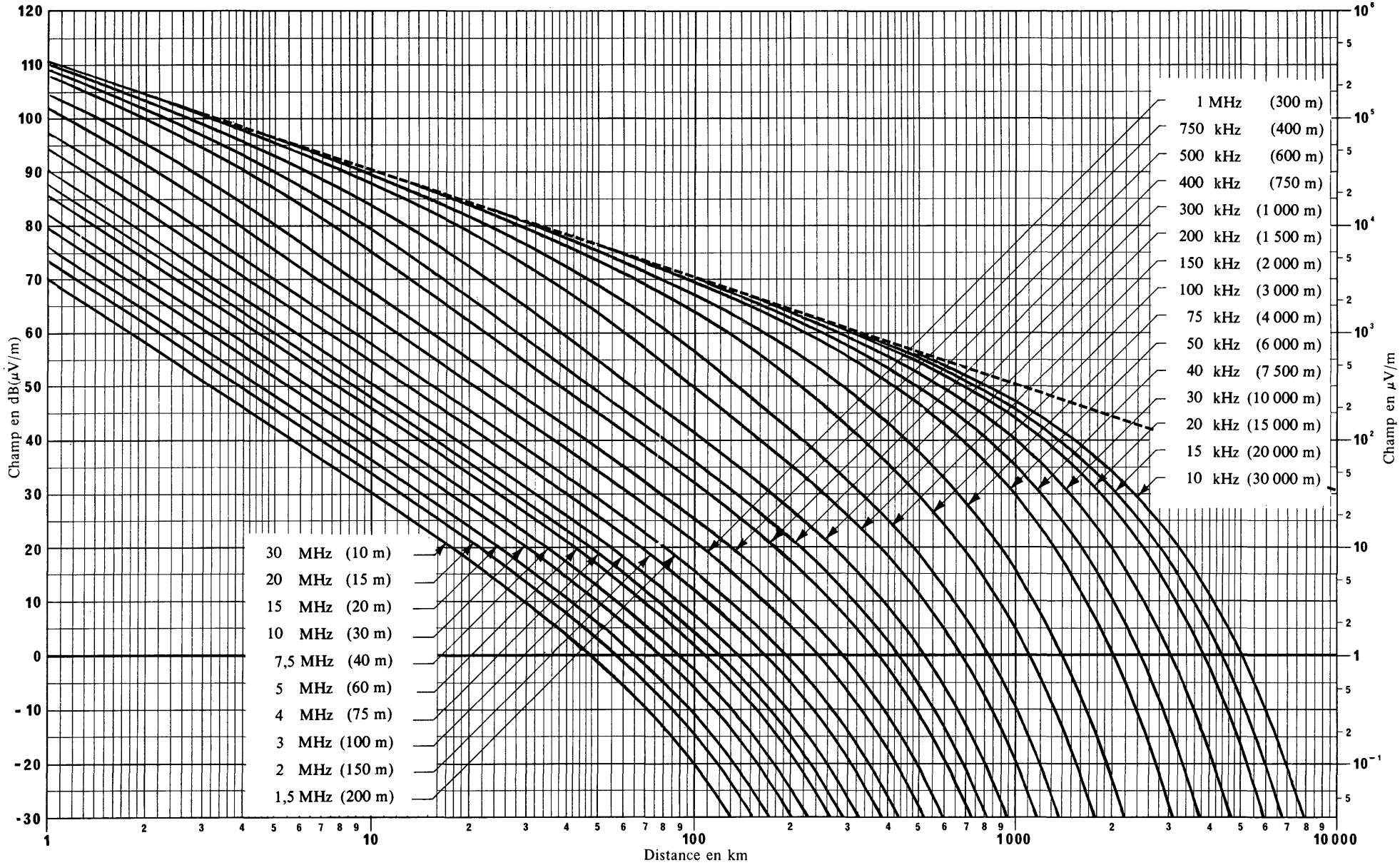



FIGURE 6

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

– – – –: Inverse de la distance

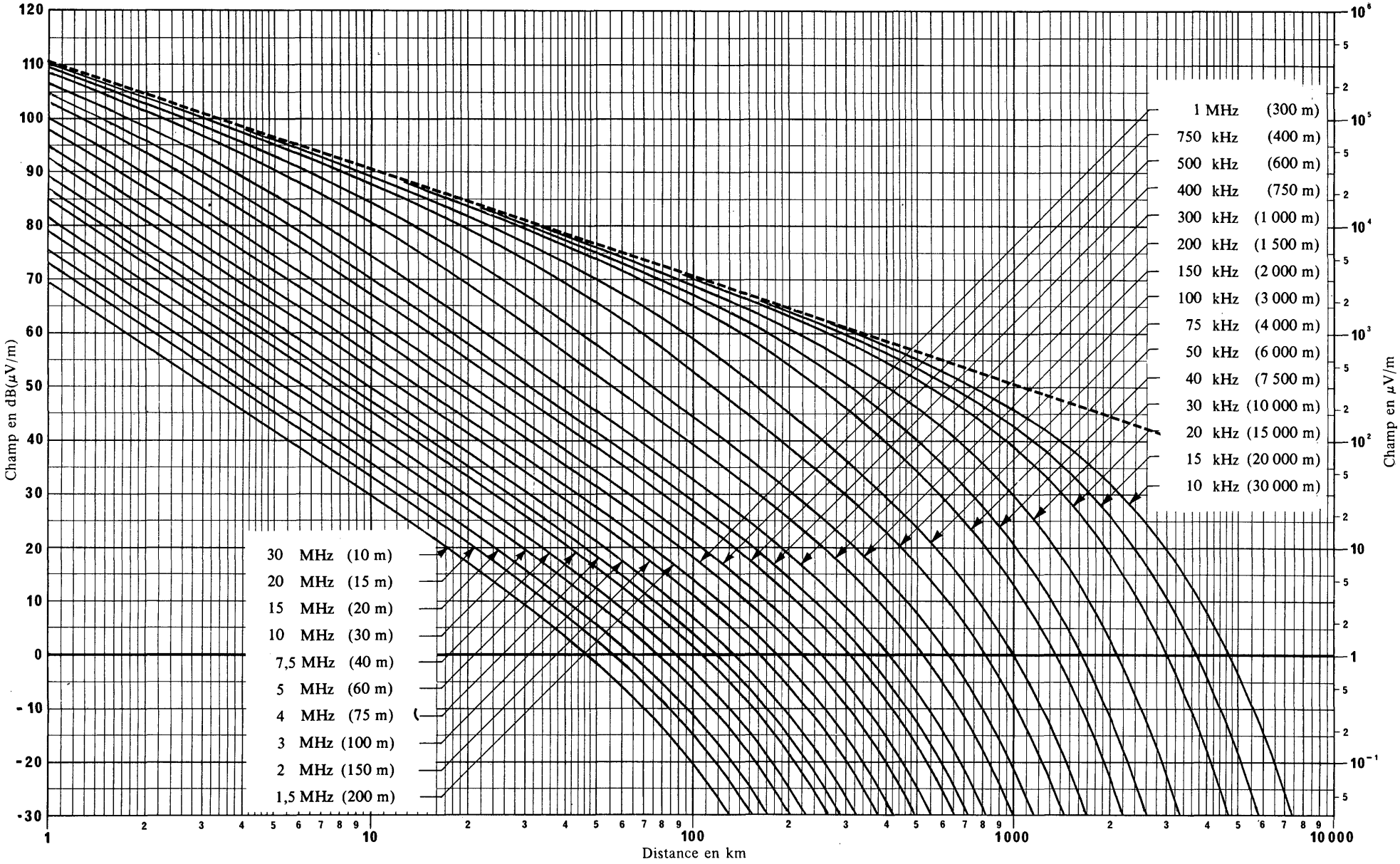



FIGURE 7

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

----: Inverse de la distance

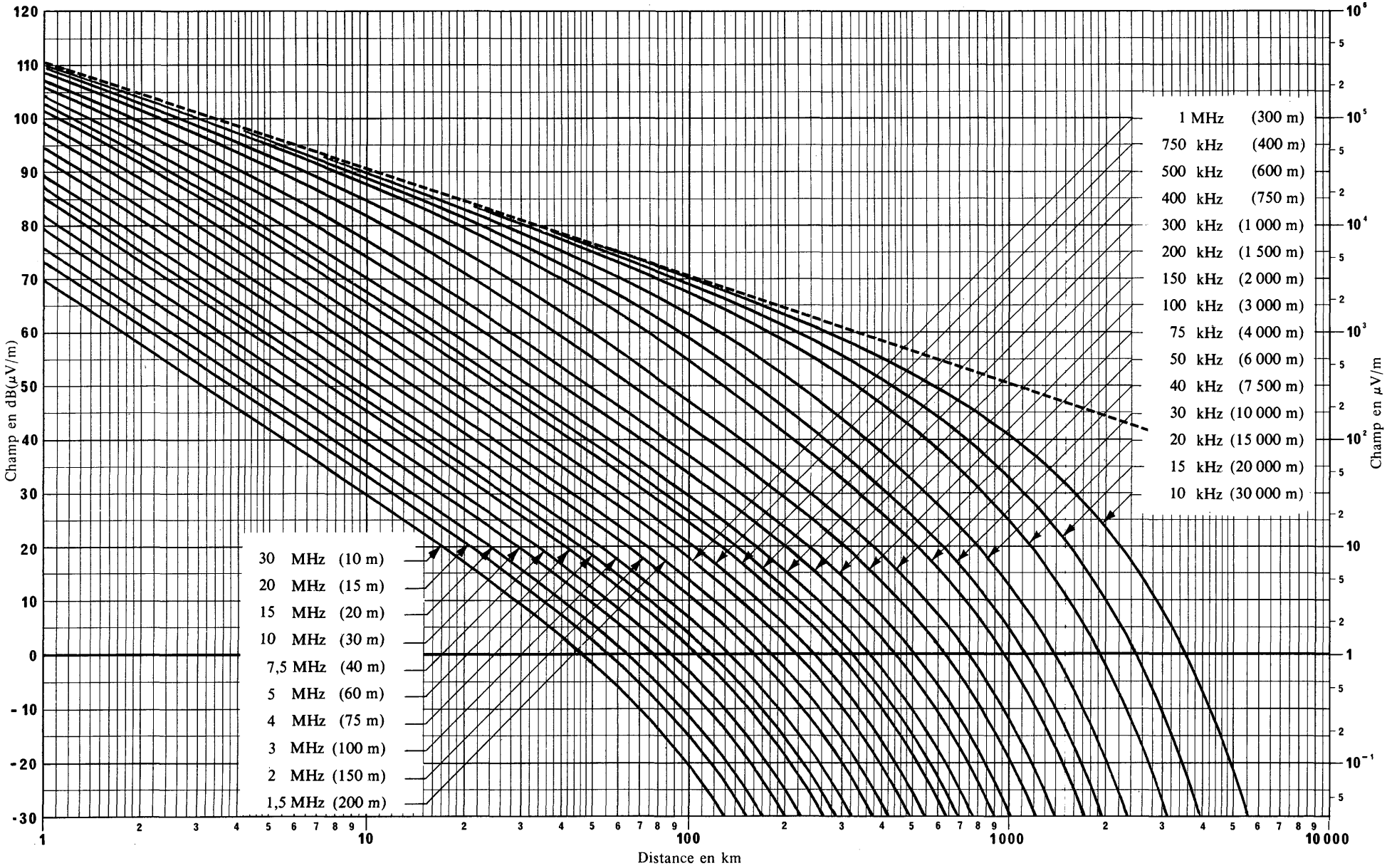



FIGURE 8

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

– – – –: Inverse de la distance

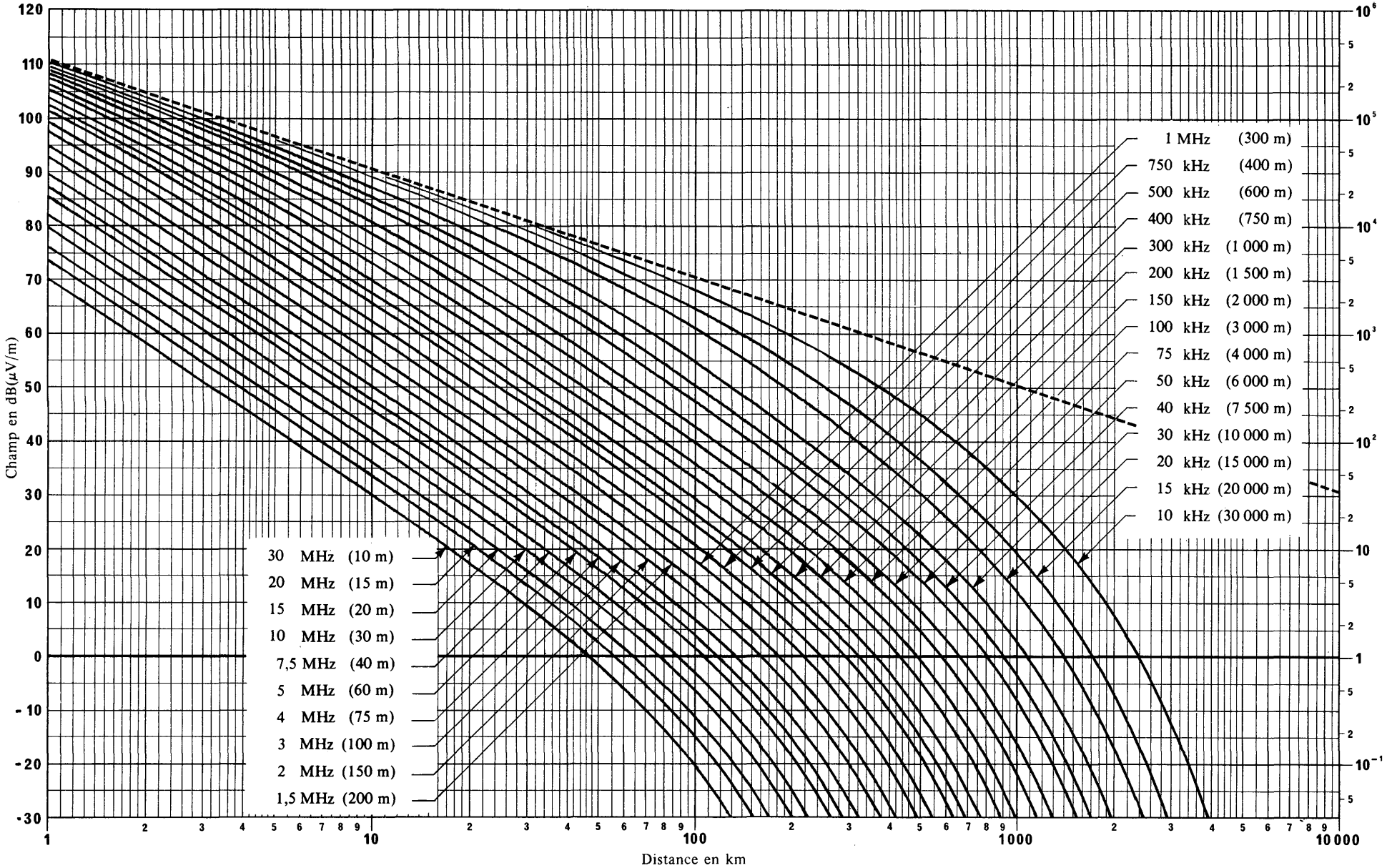





FIGURE 9

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

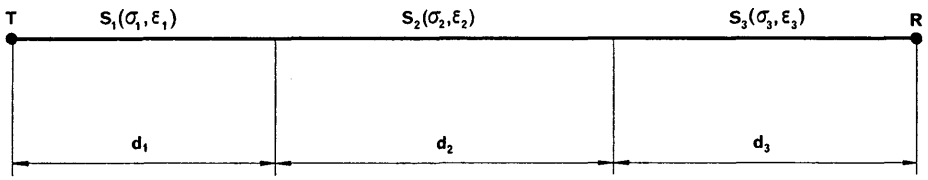
– – – – : Inverse de la distance

## ANNEXE II

### TRAJETS MIXTES

**1.** Les courbes de l'Annexe I sont applicables à la détermination de la propagation sur des trajets mixtes (au-dessus d'un sol régulier hétérogène), de la façon suivante:

Ces trajets peuvent être constitués de sections $S_1$, $S_2$, $S_3$, etc. de longueurs $d_1$, $d_2$, $d_3$, etc., ayant des conductivités et des constantes diélectriques respectives $\sigma_1$, $\varepsilon_1$; $\sigma_2$, $\varepsilon_2$; $\sigma_3$, $\varepsilon_3$, etc., comme le montre le schéma ci-dessous pour trois sections:




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

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

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

$$E_R = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) \quad (1)$$

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

$$E_T = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1) \quad (2)$$

Le champ requis est donné par ½ $[E_R + E_T]$, la manière d'étendre le calcul à un nombre plus grand de sections étant évidente.

Cette méthode pourrait en principe être étendue aux changements de phase si l'on disposait des courbes correspondantes de la phase en fonction de la distance pour un sol homogène. Ces données seraient nécessaires pour l'application aux systèmes de navigation. Cette méthode due à Milligton est généralement d'un usage facile, surtout quand on dispose d'un ordinateur.

**2.** Dans les travaux de planification pour lesquels on a besoin de connaître la couverture d'un émetteur donné, il est commode de recourir à un *procédé graphique*, fondé sur la même méthode, et qui permet d'évaluer rapidement la distance à laquelle le champ a une valeur donnée.

On trouvera ci-dessous une brève description de cette méthode graphique.

La Fig. 10 s'applique à un trajet composé de deux sections homogènes de longueurs $d_1$ et $d_2$, et de caractéristiques électriques respectives $\sigma_1$, $\varepsilon_1$, et $\sigma_2$, $\varepsilon_2$. On suppose que, dans cet exemple, le module de la permittivité (constante diélectrique) complexe * $|\varepsilon'(\sigma_1, \varepsilon_1)|$ est supérieur à $|\varepsilon'(\sigma_2, \varepsilon_2)|$. Aux distances $d$ supérieures à $d_1$, la courbe du champ obtenue par la méthode de Millington (§ 1.) est située entre les courbes correspondant aux deux jeux de constantes $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$ et $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$. A la distance $d = 2\ d_1$ ($d_1$ étant la distance de l'émetteur à la ligne de démarcation entre les deux terrains), la courbe de Millington se situe à mi-chemin entre les deux courbes précitées si le champ est tracé selon une échelle linéaire en dB. De plus, cette courbe possède une asymptote éloignée de $m$ dB de la courbe $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$, comme le montre la Fig. 10. Ici, $m$ est la demi-différence entre les courbes $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$ et $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$ au point $d = d_1$. Il est facile de tracer la courbe qui en résulte en connaissant le point par où elle passe pour $d = 2\ d_1$ et son asymptote.

La Fig. 11 représente la courbe de Millington pour un trajet composé de deux sections, dont les caractéristiques électriques sont d'abord $\sigma_2$ et $\varepsilon_2$, puis $\sigma_1$ et $\varepsilon_1$, le module de la permittivité complexe $|\varepsilon'(\sigma_1, \varepsilon_1)|$ étant supérieur à $|\varepsilon'(\sigma_2, \varepsilon_2)|$. On peut appliquer la même procédure, sans oublier que cette fois l'asymptote est parallèle à la courbe $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$.

Pour les trajets comportant plus de deux sections, chaque changement de section peut être traité séparément comme le premier. La courbe qui en résulte doit être continue, les éléments de courbe de chaque section subissant un déplacement parallèle à la courbe extrapolée à l'extrémité de la section précédente.

---

* Voir le Rapport 229-3, § 2.

La Fig. 12 montre comment on peut employer la méthode graphique approchée pour trouver la distance à laquelle le champ créé par un émetteur de 100 kW est de 1 mV/m (par exemple pour déterminer la zone de couverture) après propagation sur un trajet composé de plusieurs sections de conductivités différentes. Au moyen de courbes de propagation de l'onde de sol pour les trois valeurs différentes de la conductivité, qui représentent le champ (en dB par rapport à 1 μV/m) pour une puissance d'émission de 1 kW, on répète la méthode graphique pour les diverses sections. Les valeurs 1 mV/m et 100 kW correspondent à 40 dB par rapport à 1 μV/m et à 1 kW, ce qui, dans notre exemple, donne une distance de 170 km. C'est la couverture cherchée.

Pour l'emploi de la méthode graphique, il serait commode que l'on dispose de courbes de propagation de l'onde de sol valables pour divers jeux de caractéristiques électriques pour chaque fréquence considérée. On trouve des exemples de telles courbes aux Fig. 13 et 14 pour 200 kHz et 700 kHz. Il est facile de préparer d'autres courbes pour un certain nombre de fréquences en se servant de l'Annexe I. Dans certains cas, il est commode d'utiliser une échelle linéaire pour la distance.

La précision de la méthode graphique dépend de la différence de pente des courbes du champ et donc, dans une certaine mesure, de la fréquence. Dans la bande des ondes kilométriques, la différence entre la méthode décrite dans le § 1 de la présente Annexe et cette méthode approchée est normalement minime, mais, dans la partie supérieure de la bande des ondes hectométriques, la différence peut atteindre au plus 3 dB dans la majorité des cas. La Fig. 15 donne les résultats de la comparaison avec l'aide d'un ordinateur entre la méthode de Millington et la méthode approchée.

Pour une description complète de la méthode graphique, on peut se référer à un article de [Stokke, 1975].

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

STOKKE, K. N. [1975] Analyse graphique de la méthode de Millington pour le calcul du champ au-dessus d'un terrain non homogène. UIT, *Journal des télécommunications*, Vol. 42, N° III.

## BIBLIOGRAPHIE

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

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

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

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

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

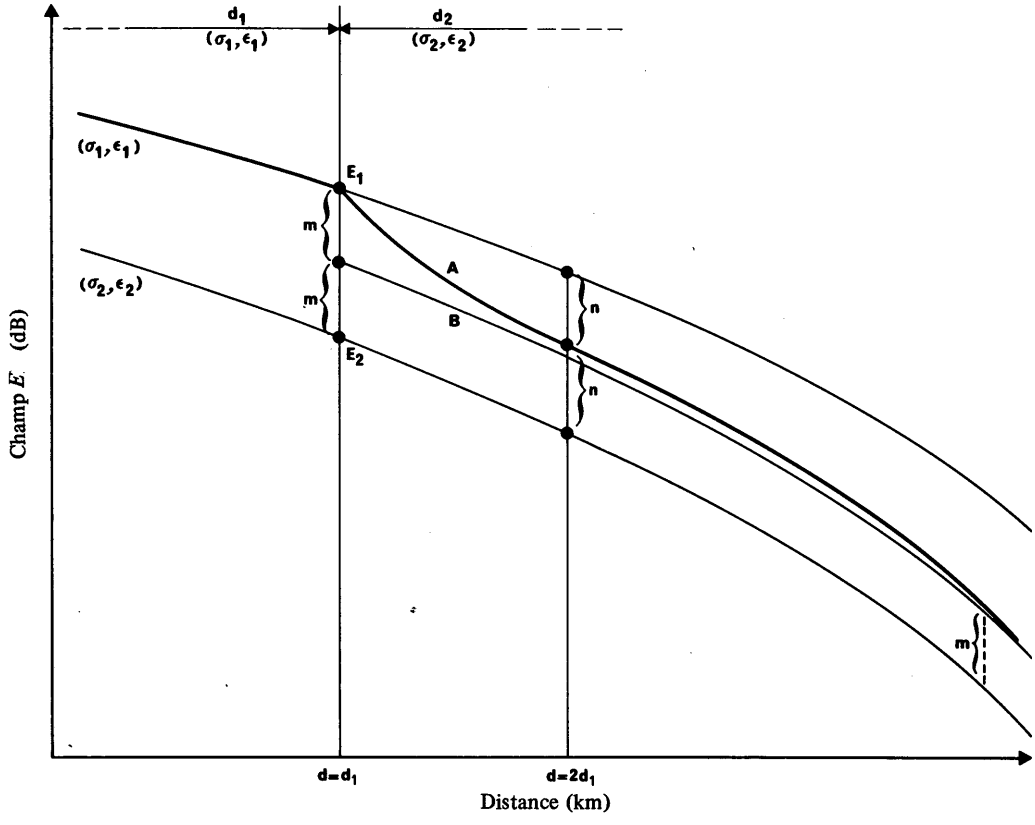



FIGURE 10 – *Comparaison des résultats*

A: Courbe du champ de Millington
B: Courbe asymptote

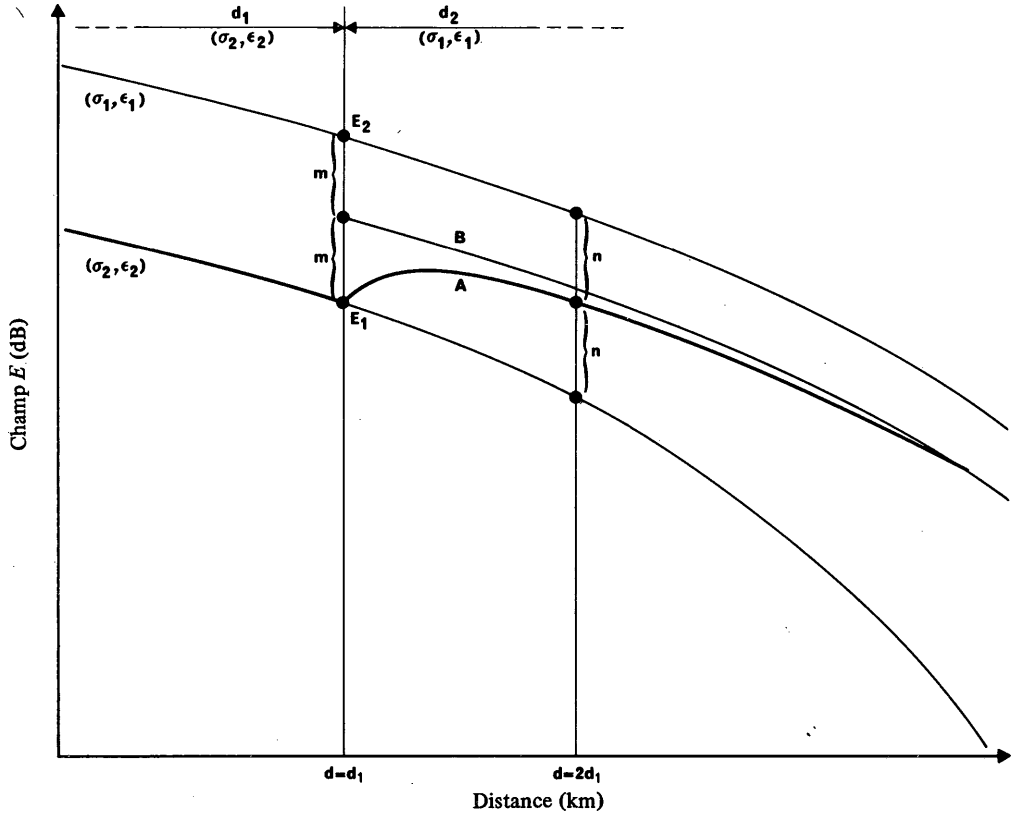



FIGURE 11 – *Comparaison des résultats*

A: Courbe du champ de Millington
B: Courbe asymptote

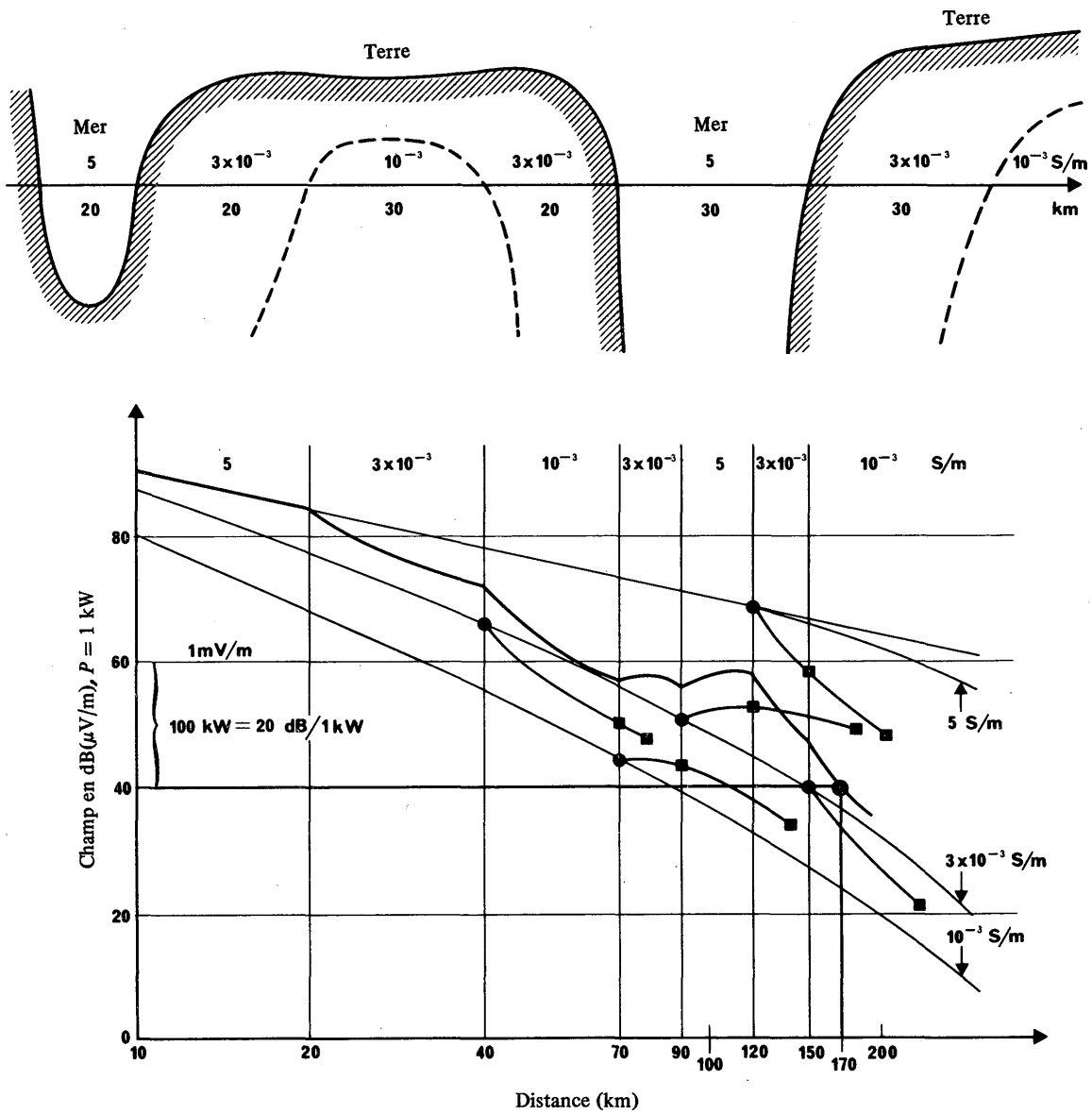



FIGURE 12 – *Courbe de champ pour trajets mixtes*

Fréquence: 700 kHz

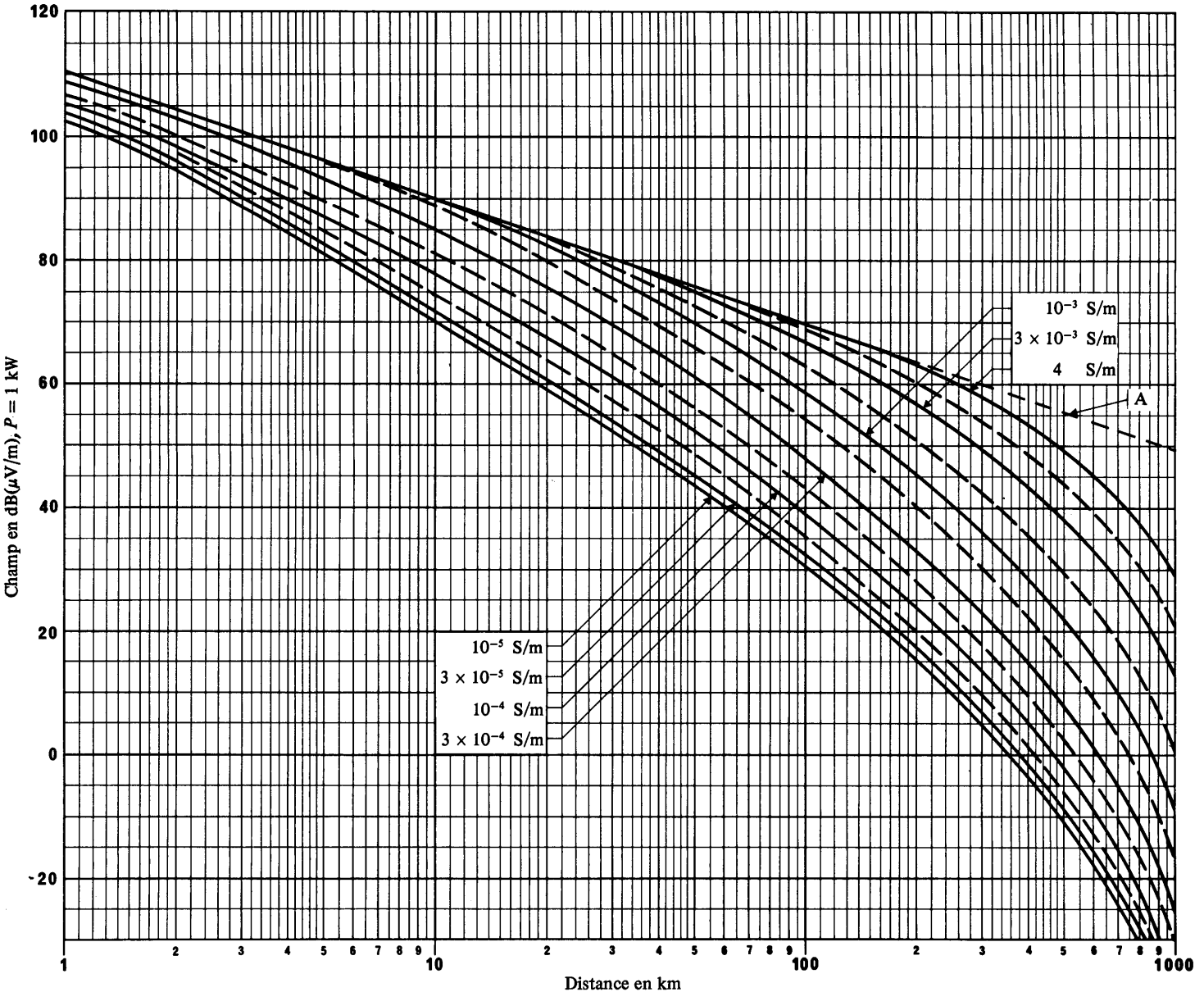



FIGURE 13 – *Propagation de l'onde de sol: valeurs différentes de σ*

Fréquence: 200 kHz

— — — — Courbes pour trajets mixtes avec $d_1 = d_2$

A: Inverse de la distance

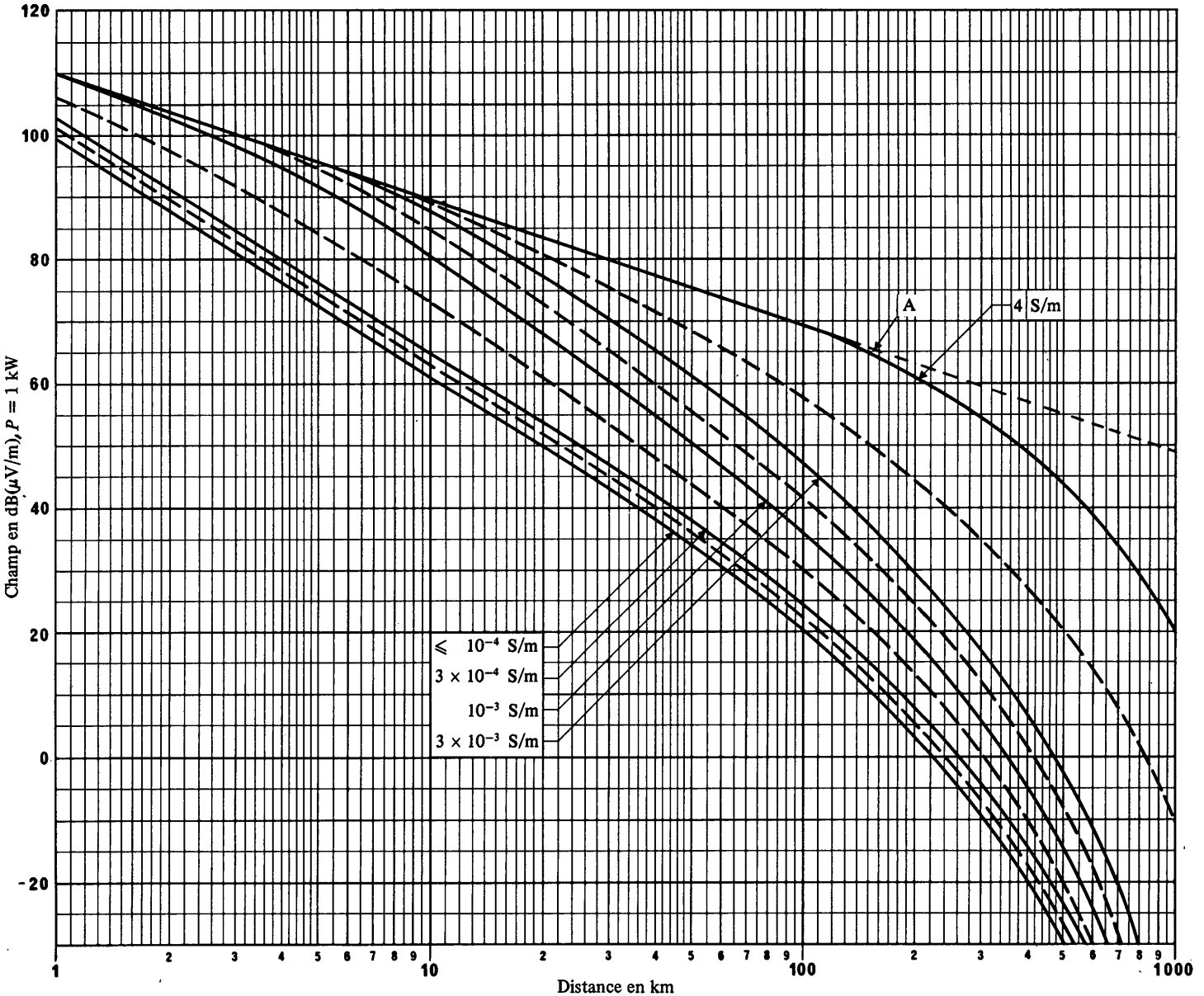



FIGURE 14 – *Propagation de l'onde de sol: valeurs différentes de σ*

Fréquence: 700 kHz

— — — — Courbes pour trajets mixtes avec $d_1 = d_2$

A: Inverse de la distance

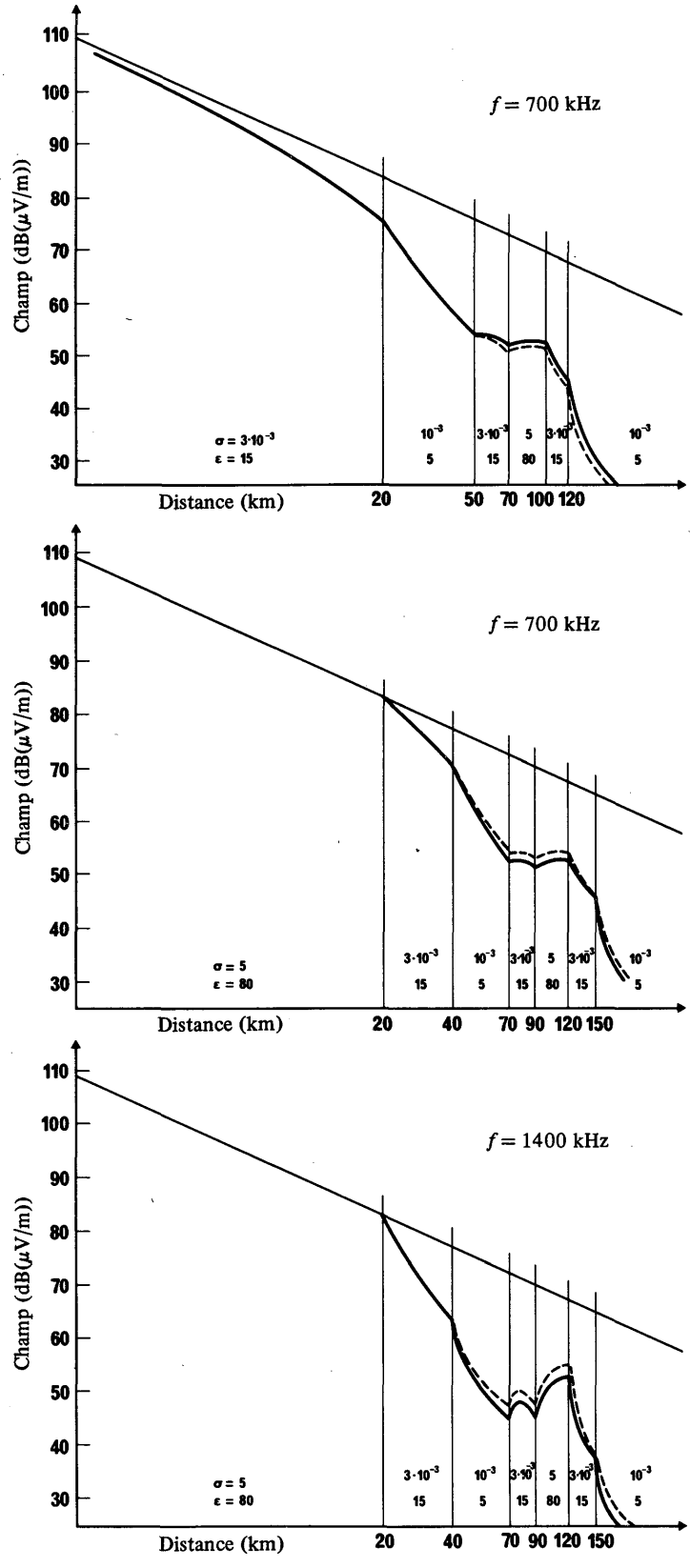



FIGURE 15 – *Comparaison des résultats*

– – – – – Méthode approchée

——— Méthode de Millington

σ exprimé en S/m

RAPPORT 714

# PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL DANS UNE ATMOSPHÈRE EXPONENTIELLE

(Question 2-3/5)

(1978)

## 1. Introduction

Dans les courbes antérieures de propagation de l'onde de sol, qui ont été remplacées par l'Avis 368-3, on ne tenait pas compte de la réfraction troposphérique. La troposphère était assimilée au vide, de telle sorte que son indice de réfraction, $n$, et son indice de réfraction modifié, $m$, étaient:

$$n = 1, \quad m = n + \frac{h}{a} = 1 + \frac{h}{a} \tag{1}$$

où $h$ est la hauteur et $a$ le rayon de la Terre.

Dans l'Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences supérieures à 30 MHz [CCIR, 1955 et 1959], l'indice de réfraction troposphérique, considéré comme inversement proportionnel à la hauteur, a pour expression:

$$n = n_s - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{h}{a}, \quad m = n_s + \frac{h}{ka} \tag{2}$$

où $n_s \approx 1{,}0003$ est la valeur de $n$ à la surface de la Terre et $k$ le facteur donnant le rayon terrestre équivalent, que l'on admet être égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre dans les courbes susmentionnées. L'expression (2) se ramène à l'expression (1) quand $n_s = k = 1$.

En fait, l'indice de réfraction moyen de la troposphère varie exponentiellement avec la hauteur:

$$n = 1 + (n_s - 1) \exp(-h/h_s) \tag{3}$$

où $h_s$ ($\approx$ 7 km) correspond à la hauteur de transition de la troposphère. Ce modèle a été entièrement décrit par [Bean et Dutton, 1966] et accepté comme atmosphère de référence dans l'Avis 369-2. Pour $h \gg h_s$, il tend vers l'expression (1). Pour $h \ll h_s$, il tend vers l'expression (2), avec $h_s = ka(n_s - 1) \cdot (k - 1)^{-1}$.

Aux fréquences inférieures à 10 MHz, le gain de hauteur est faible pour des hauteurs moyennes, 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. En revanche, 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 variation inversement proportionnelle à la hauteur et justifie l'utilisation d'un rayon équivalent 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 est inversement proportionnel à cette distance 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 368-3, 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 3-2/5.

## 2. Analyse théorique

Au cours des dernières années, on a mis au point au Royaume-Uni [Rotheram, 1970] une méthode d'analyse qui tient compte des effets d'une troposphère dont l'indice de réfraction varie selon une loi exponentielle en fonction de la hauteur. Les paragraphes ci-après décrivent les méthodes utilisées pour calculer le champ dans différents domaines.

### 2.1 *Champ près de la surface du sol à courte distance*

Au voisinage de l'émetteur, le champ produit près de la surface du sol par une source se trouvant au sol répond à la théorie de la Terre plane de Sommerfeld. A mesure que la distance augmente, on peut appliquer des corrections pour tenir compte de la courbure réelle de la Terre, selon la méthode décrite [Bremmer, 1949]. D'autres corrections doivent être appliquées dans le cas d'une atmosphère exponentielle. La théorie de Sommerfeld élargie est utile jusqu'à des distances de l'ordre de $10\,\lambda^{1/3}$ (km) et des hauteurs de l'ordre de $35\lambda^{2/3}m$, où $\lambda$ est la longueur d'onde en mètres.

2.2 *Région de visibilité directe*

Dans la région de visibilité directe, le champ est produit par la somme de l'onde directe et de l'onde réfléchie, dont on représente les phases par des intégrales, en appliquant la méthode de la phase stationnaire, ce qui revient à opérer en optique géométrique. Ce cas diffère de celui de l'atmosphère linéaire en ce que les positions des points de phase stationnaire et les intégrales sont à évaluer numériquement.

2.3 *Région de diffraction*

La région de diffraction se situe à des distances supérieures à environ $10\,\lambda^{1/3}$ (km) (voir le § 2.1) au voisinage de la surface du sol ou au-delà de l'horizon radioélectrique pour des installations terminales surélevées. Dans ce cas, le champ peut être représenté par la série des résidus ou par la série des modes du guide d'ondes. A chaque mode sont associées une valeur propre – la constante de propagation – et une fonction propre – la fonction gain de hauteur. La constante de propagation détermine la variation du mode en fonction de la distance. La fonction gain de hauteur détermine la variation du mode en fonction de la hauteur. La fonction propre est la solution d'une équation différentielle ordinaire du second ordre; on obtient la valeur propre en imposant les conditions aux limites. Il existe une infinité de modes mais seuls quelques-uns sont nécessaires. On utilise jusqu'à neuf modes. On applique une méthode exacte d'aplanissement de la Terre: la transformation de Langer [Langer, 1937]. Pour les modèles représentés par les expressions (1) et (2) ci-dessus, les solutions sont connues sous la forme analytique de fonctions d'Airy. Pour le modèle exponentiel, les solutions ne peuvent pas être exprimées par des fonctions générales. Les approximations WKB, fonctions intégrales d'Airy [Bremmer, 1960 et 1962] sont utilisées pour donner des approximations initiales des valeurs propres. On intègre ensuite numériquement l'équation différentielle de Riccati (impédance d'onde ou coefficient de réflexion de l'onde) et la valeur propre se détermine par la méthode de Newton. On trouve enfin la fonction gain de hauteur par intégration numérique.

2.4 *Différences de propagation dans des atmosphères linéaires et exponentielles*

A des hauteurs supérieures à environ 1 km, l'expression (3) diffère sensiblement de l'expression (2) en raison d'une diminution de la réfraction. Ainsi, pour les fréquences supérieures ou égales à 30 MHz, les propriétés de réfraction en deçà de l'horizon et les fonctions gain de hauteur au-delà de l'horizon diffèrent d'une manière appréciable. Une correction pour les fonctions gain de hauteur a déjà été définie [Millington, 1958].

Les modes du guide d'ondes ont une étendue verticale (largeur de piste) $h_m$. Lorsque $h_m \ll h_s$ – ce qui se produit au-dessus d'environ 10 MHz – la constante de propagation d'un mode calculée au moyen de l'expression (3) tend vers la valeur donnée par l'expression (2). Lorsque $h_m \gg h_s$ – ce qui se produit au-dessous d'environ 10 kHz – la constante tend vers la valeur donnée par l'expression (1). Lorsqu'on passe de 10 kHz à 10 MHz, la constante de propagation passe progressivement de son expression (1) à son expression (2). Cela peut être interprété comme une variation continue du facteur donnant le rayon équivalent de la Terre, de 1 à 4/3, à mesure que la fréquence s'élève. Cette variation a déjà été décrite [Rotheram, 1970; Gerks, 1971].

## 3. Programme d'ordinateur

Un programme GRWAVE * écrit en FORTRAN IV a été mis au point à l'aide des méthodes décrites plus haut. Les données d'entrée sont les constantes $n_s$ et $h_s$ de l'expression (3), les constantes du sol, la fréquence radioélectrique et les caractéristiques de polarisation. Dans chaque mode de fonctionnement, on se donne les limites minimale et maximale du calcul, le pas du calcul des distances et des ensembles de valeurs représentant les hauteurs de l'émetteur et du récepteur. Chaque ensemble peut comporter jusqu'à 50 éléments. Le champ se calcule pour toutes les paires de hauteurs des antennes. Il suffit évidemment, pour chaque mode, d'avoir une seule valeur propre et de faire une seule intégration de l'équation différentielle donnant la fonction gain de hauteur. On introduit plusieurs codes pour commander le mode de fonctionnement et la quantité de données à sortir. La donnée de sortie principale est le champ en chaque point. Elle est exprimée en μV/m pour un émetteur dont le doublet a un moment de $5\lambda/\pi\sqrt{3}$ (A · m) et qui produit un champ de $1{,}732 \times 10^5$ μV/m à 1 km, c'est-à-dire le champ en espace libre d'une antenne isotrope rayonnant 1 kW. On obtient aussi à la sortie l'affaiblissement de transmission et le champ par rapport à son niveau espace libre. Des renseignements sur les anneaux d'interférence sont également fournis pour la région à visibilité directe. En utilisant un code, on peut obtenir d'autres renseignements, notamment les caractéristiques de propagation et les fonctions gain de hauteur, ou des données analytiques très poussées qui permettent le diagnostic des erreurs.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology,* NBS.

BREMMER, H. [1949] *Terrestrial Radio Waves.* Elsevier.

BREMMER, H. [1960 et 1962] On the theory of wave propagation through a concentrically stratified troposphere with a smooth profile. Part I: Discussion of the extended WKB approximation. *NBS Journ. of Research,* **64D**, 467 (1960). Part II: Expansion of the rigourous solution. *Ibid.,* **66D**, 31 (1962).

* Le Secrétariat du CCIR tient ce programme à la disposition des administrations; si les paramètres appropriés lui sont communiqués, le service de l'ordinateur de l'UIT pourra faire les calculs nécessaires.

GERKS, I. H. [juillet 1971] *Radio Science,* Vol. 6, **7**, 681-687.

LANGER, R. E. [1937] *Phys. Rev.*, **51**, 669-676.

MILLINGTON, G. [1958] *Marconi Review,* Vol. XXI, **131**, 143-160, 4e trimestre.

ROTHERAM, S. [décembre 1970] *Electronics Letters,* Vol. 6, **25**, 794.

*Publications de l'UIT préparées par le CCIR*

[1955] Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 et 300 MHz. (UIT, Genève.)

[1959] Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 et 10 000 MHz. (UIT, Genève.)

---

## AVIS 526

## PROPAGATION PAR DIFFRACTION

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

qu'il est nécessaire de donner des indications aux ingénieurs pour le calcul du champ sur des trajets par diffraction,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les informations contenues dans le Rapport 715 soient utilisées pour le calcul du champ sur des trajets par diffraction.

---

## RAPPORT 715

## PROPAGATION PAR DIFFRACTION

(Programme d'études 1A-1/5)

(1978)

### 1. Introduction

Dans une propagation au-dessus de la surface terrestre, on rencontre souvent des trajets avec diffraction, et il est nécessaire alors d'estimer l'affaiblissement de transmission dû à la diffraction sur une surface terrestre sphérique ou sur un terrain irrégulier qui comprend éventuellement différentes sortes d'obstacle.

Bien que la diffraction soit produite seulement par la surface du sol, on doit tenir compte de la réfraction moyenne de l'atmosphère le long du trajet pour évaluer ses caractéristiques géométriques dans son plan vertical (angle de diffraction, rayon de courbure, hauteur d'obstacle). A cet effet, le profil du terrain sous-jacent doit être tracé avec le rayon terrestre équivalent convenable (Rapport 563-1). En l'absence d'autres indications, on peut tabler sur un rayon terrestre équivalent de 8500 km.

### 2. Diffraction sur une Terre sphérique

#### 2.1 *Calcul numérique*

Pour déterminer l'affaiblissement de diffraction $A$ par rapport à l'espace libre au-delà de l'horizon, au-dessus d'une Terre sphérique lisse, on peut utiliser une formule approchée [NBS, 1967]:

$$A = G(\chi_0) - F(\chi_1) - F(\chi_2) - 20{,}5 \quad \text{dB} \tag{2.1}$$

dans laquelle

$$\chi_0 = d_0 \cdot Bo \tag{2.2}$$

$$\chi_1 = d_1 \cdot Bo \tag{2.3}$$

$$\chi_2 = d_2 \cdot Bo \tag{2.4}$$

$$Bo = 670(f/a_e^{\,2})^{1/3} \tag{2.5}$$

$d_0$ est la distance totale (km) et $d_1$ et $d_2$ les distances (km) entre chaque antenne et son horizon radioélectrique:

$$d_1 = \sqrt{2a_e h_1} \tag{2.6}$$

$$d_2 = \sqrt{2a_e h_2} \tag{2.7}$$

dans lesquelles $h_1$ et $h_2$ sont les hauteurs des antennes (km), $a_e$ est le rayon terrestre équivalent (km) défini dans le Rapport 563-1 et $f$ est la fréquence (MHz).

Les fonctions $G(\chi_0)$, $F(\chi_1)$, $F(\chi_2)$ sont tracées sur la Fig. 1. Le facteur $K$ considéré dans cette figure dépend de la fréquence et des caractéristiques électriques du sol. La courbe $K = 0$ s'applique en polarisation horizontale au-dessus de l'eau ou d'un sol bon à moyen, à des fréquences égales ou supérieures à 100 MHz. En polarisation horizontale au-dessus d'un sol médiocre, cette même courbe est applicable à des fréquences égales ou supérieures à 600 MHz et, approximativement (à 2 dB près) à des fréquences s'abaissant jusqu'à 100 MHz. En polarisation verticale au-dessus de terres, la courbe $K = 0{,}01$ est applicable à des fréquences égales ou supérieures à 600 MHz. En polarisation verticale au-dessus de la mer, les courbes $K = 0{,}01$, 0,1, 0,3 et 1,0 sont applicables à des fréquences égales ou inférieures respectivement à 3300 MHz, 120 MHz, 30 MHz et 7,5 MHz.

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

$$\chi_0 - \chi_1 \cdot \Delta(\chi_1) - \chi_2 \cdot \Delta(\chi_2) > 320 \qquad (2.8)$$

en polarisation horizontale, ou en polarisation verticale sur des trajets terrestres. En polarisation verticale, sur des trajets maritimes, l'erreur sur $A$ sera inférieure ou égale à 1,5 dB lorsque la limite indiquée dans le membre de droite de (2.8) sera de 320 pour les fréquences au moins égales à 600 MHz ($K \leqslant 0{,}03$), 335 pour 120 MHz ($K = 0{,}1$) et 115 pour 7,5 MHz et au-dessous ($K \geqslant 1{,}0$).

Les fonctions auxiliaires $\Delta(\chi_1)$ et $\Delta(\chi_2)$ sont tracées sur la Fig. 1. L'inégalité (2.8) implique la prépondérance du premier terme de la série des résidus.

*Note.* – Dans le cas où la polarisation n'est pas rectiligne, on ne pourra pas, vu le manque d'information sur la phase, se borner à décomposer le champ en des composantes rectilignes orthogonales. L'étude de ce point est à poursuivre.

### 2.2 *Calcul nomographique*

Dans les mêmes conditions d'approximation (prépondérance du premier terme de la série des résidus), on peut aussi faire le calcul par la formule suivante:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(d) + G(h_1) + G(h_2) \qquad \text{dB} \qquad (2.9)$$

où

$E$: champ à la réception

$E_0$: champ en espace libre à la même distance

$d$: distance entre les extrémités de la liaison

$h_1$, $h_2$: hauteurs des antennes au-dessus d'une Terre sphérique.

Les fonctions $F$ (influence de la distance) et $G$ (gain de hauteur) sont représentées par des nomogrammes aux Fig. 2, 3, 4 et 5. [Boithias, 1972]; ces fonctions ont des signes opposés.

Ces nomogrammes donnent directement le niveau du signal reçu, par rapport au niveau en espace libre, pour $k = 1$ $k = 4/3$ et pour des fréquences supérieures à 30 MHz environ. $k$ est le facteur donnant le rayon terrestre équivalent; il est défini dans le Rapport 563-1. Cependant, on peut calculer le niveau reçu pour d'autres valeurs de $k$ en utilisant l'échelle des fréquences pour $k = 1$, la fréquence considérée $f$ étant remplacée par une fréquence fictive égale à $f/k^2$ pour les Fig. 2 et 4 et à $f/\sqrt{k}$ pour les Fig. 3 et 5.

Très près du sol, le champ est pratiquement indépendant de la hauteur. Ce phénomène est surtout important en polarisation verticale sur un trajet maritime. C'est pourquoi la Fig. 5 comporte un segment vertical AB en trait gras. Si la droite d'alignement coupait ce segment vertical limite AB, il faudrait remplacer la hauteur réelle par une hauteur fictive plus grande, de façon que la droite d'alignement passe juste par le point supérieur A.

*Note.* – Si l'on veut obtenir l'affaiblissement par rapport à la propagation en espace libre, il faut inverser le signe de l'échelle des gains de hauteur sur le nomogramme.

## 3. Diffraction par des obstacles ou sur un terrain irrégulier

De nombreux trajets de propagation comportent un ou plusieurs obstacles isolés, et il est intéressant d'estimer les affaiblissements introduits par ceux-ci. Pour les calculer, on est conduit à schématiser la forme des obstacles par une arête vive (en lame de couteau) ou par une arête arrondie et lisse, dont le rayon de courbure est bien défini. Il est bien certain que les obstacles réels ont des formes plus complexes, aussi les indications données dans ce Rapport doivent-elles être considérées comme une approximation seulement.

On suppose dans ce Rapport que la longueur d'onde est assez petite par rapport à la taille des obstacles, c'est-à-dire qu'il s'agit principalement d'ondes métriques ou plus courtes ($f > 30$ MHz).

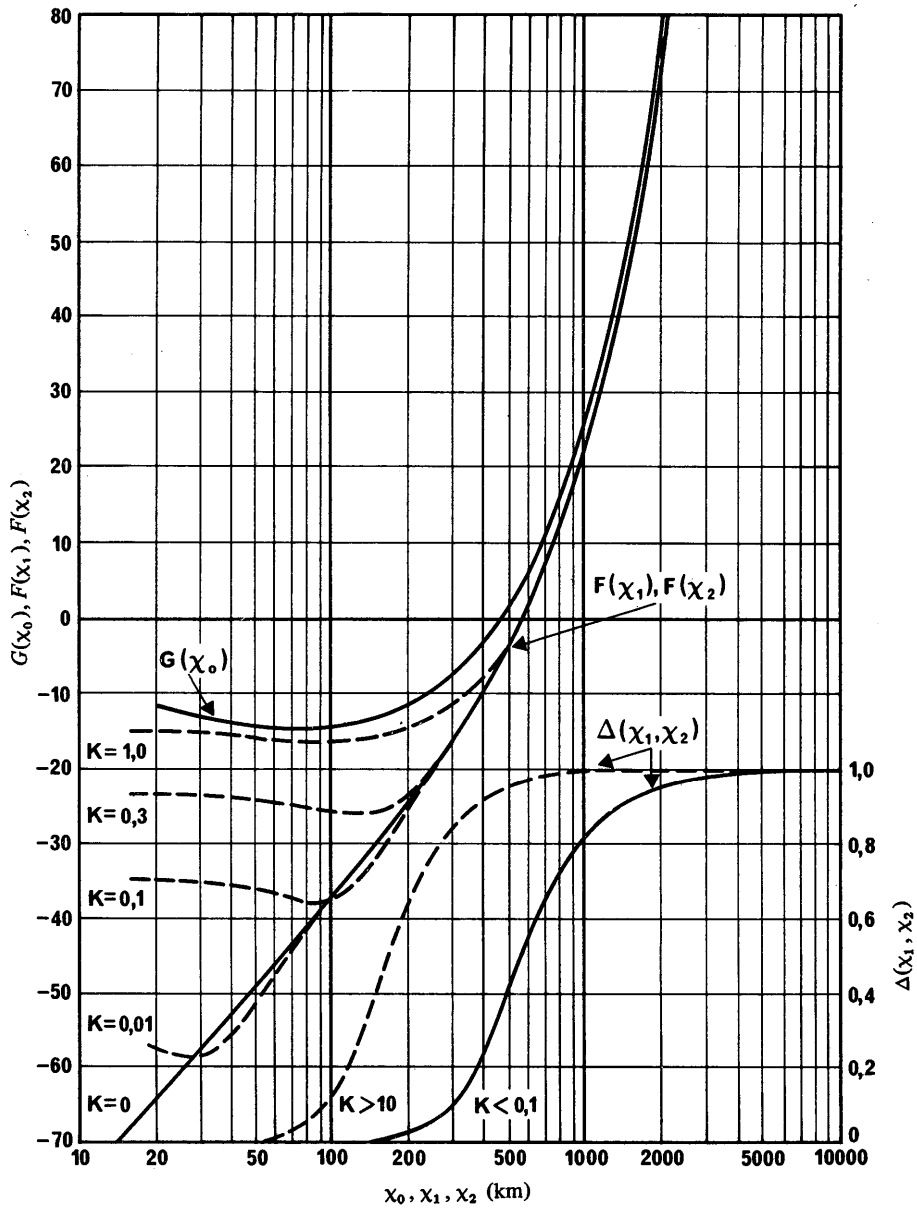



FIGURE 1 – *Fonctions G et F de la formule (2.1)*

Note. – Pour les grandes valeurs de $\chi$:

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

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

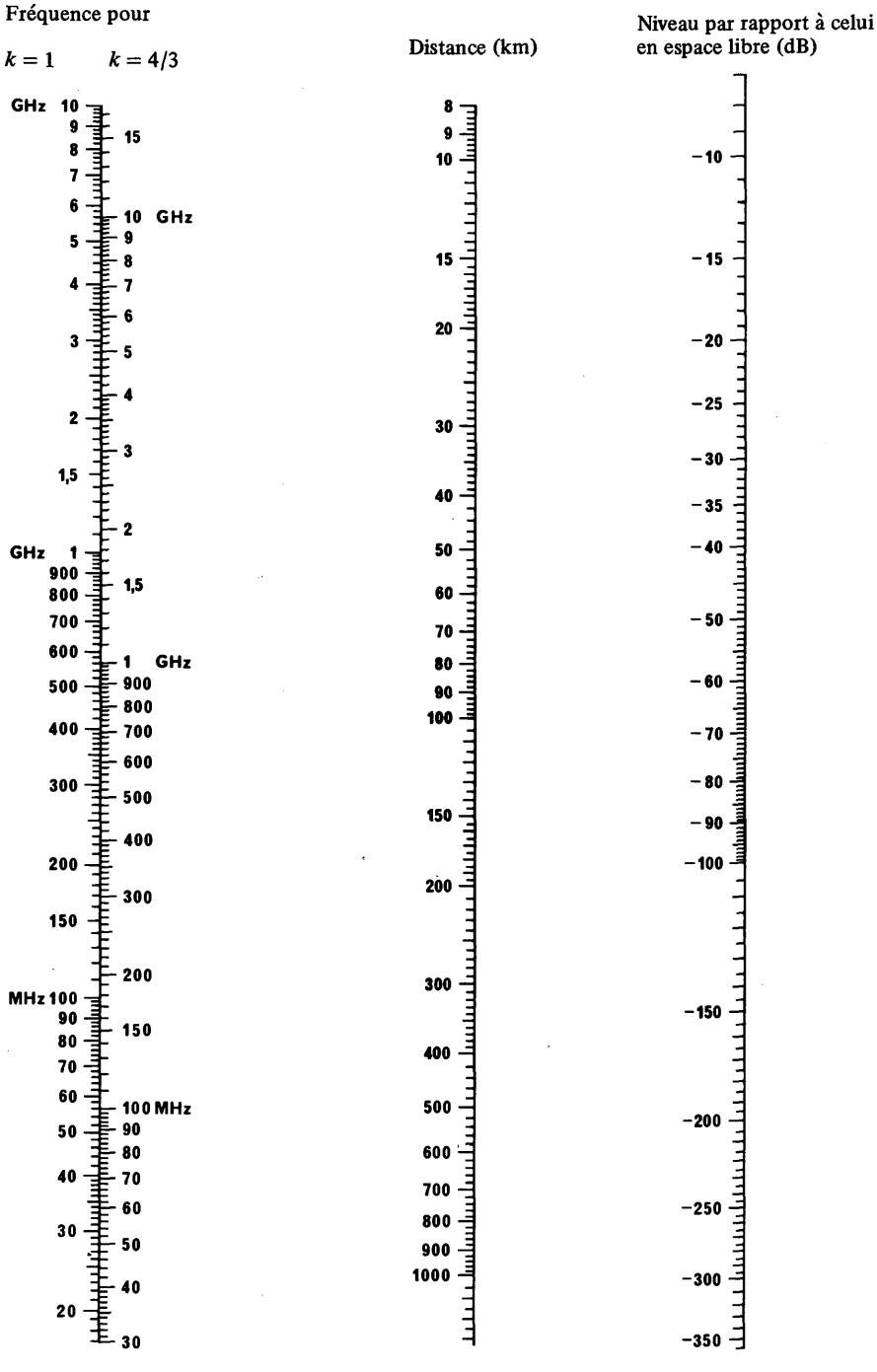



FIGURE 2 – *Diffraction sphérique – Affaiblissement dû à la distance*

Polarisation horizontale – trajet terrestre ou maritime

Polarisation verticale – trajet terrestre

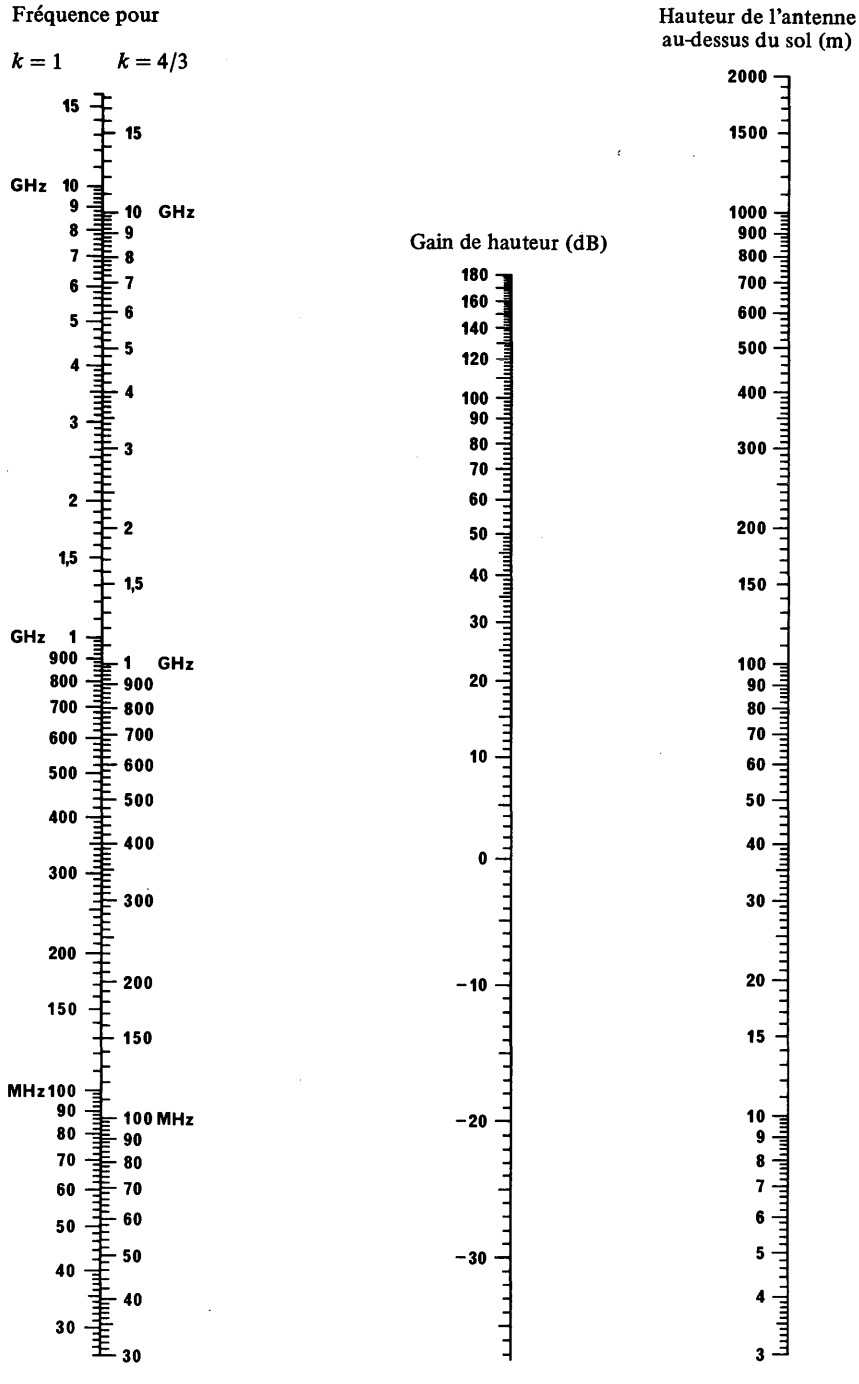



FIGURE 3 – *Diffraction sphérique – Gain de hauteur*

Polarisation horizontale – trajet terrestre ou maritime
Polarisation verticale – trajet terrestre

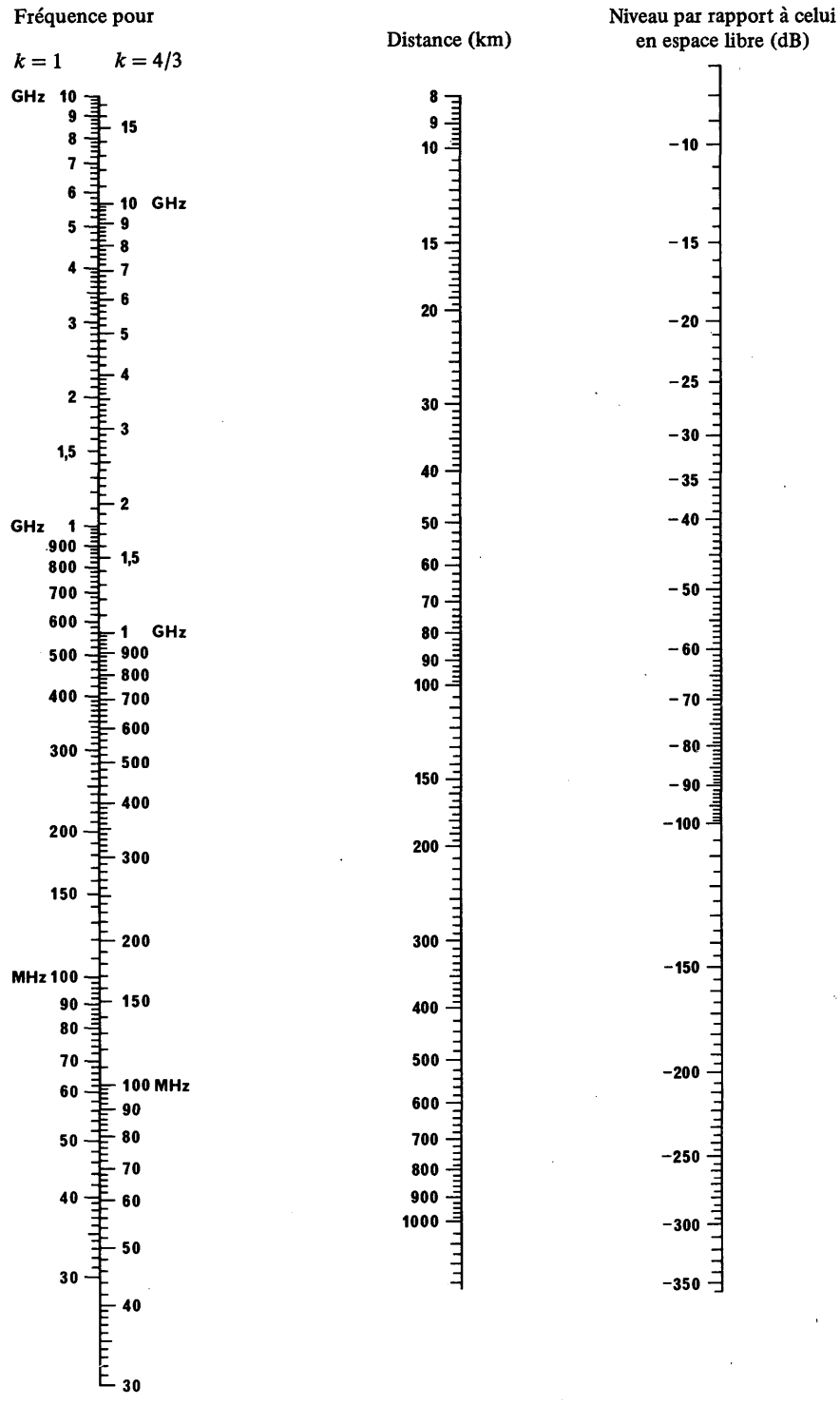



FIGURE 4 – *Diffraction sphérique – Affaiblissement dû à la distance*
Polarisation verticale – trajet maritime

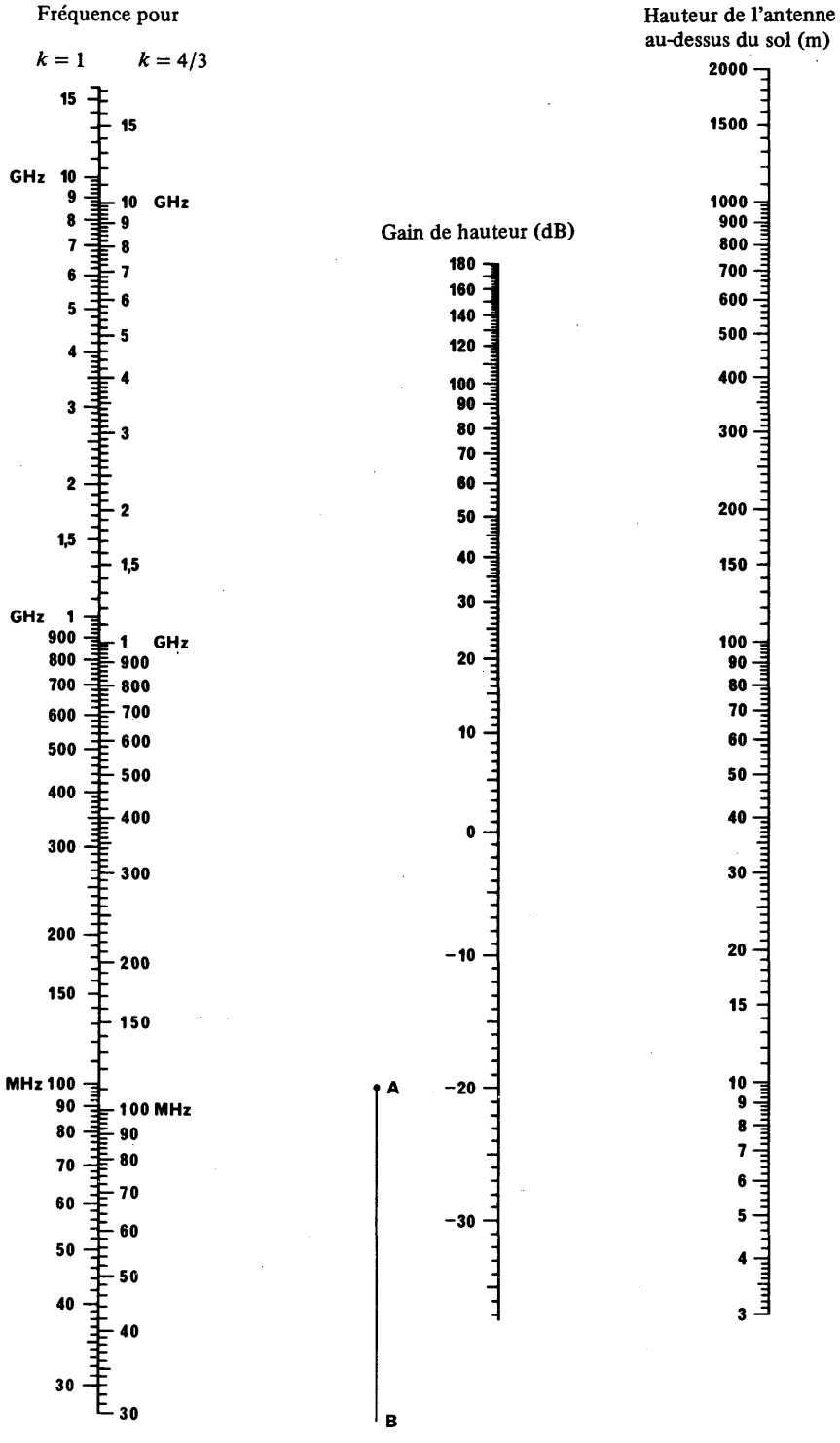



FIGURE 5 – *Diffraction sphérique – Gain de hauteur*
Polarisation verticale – trajet maritime

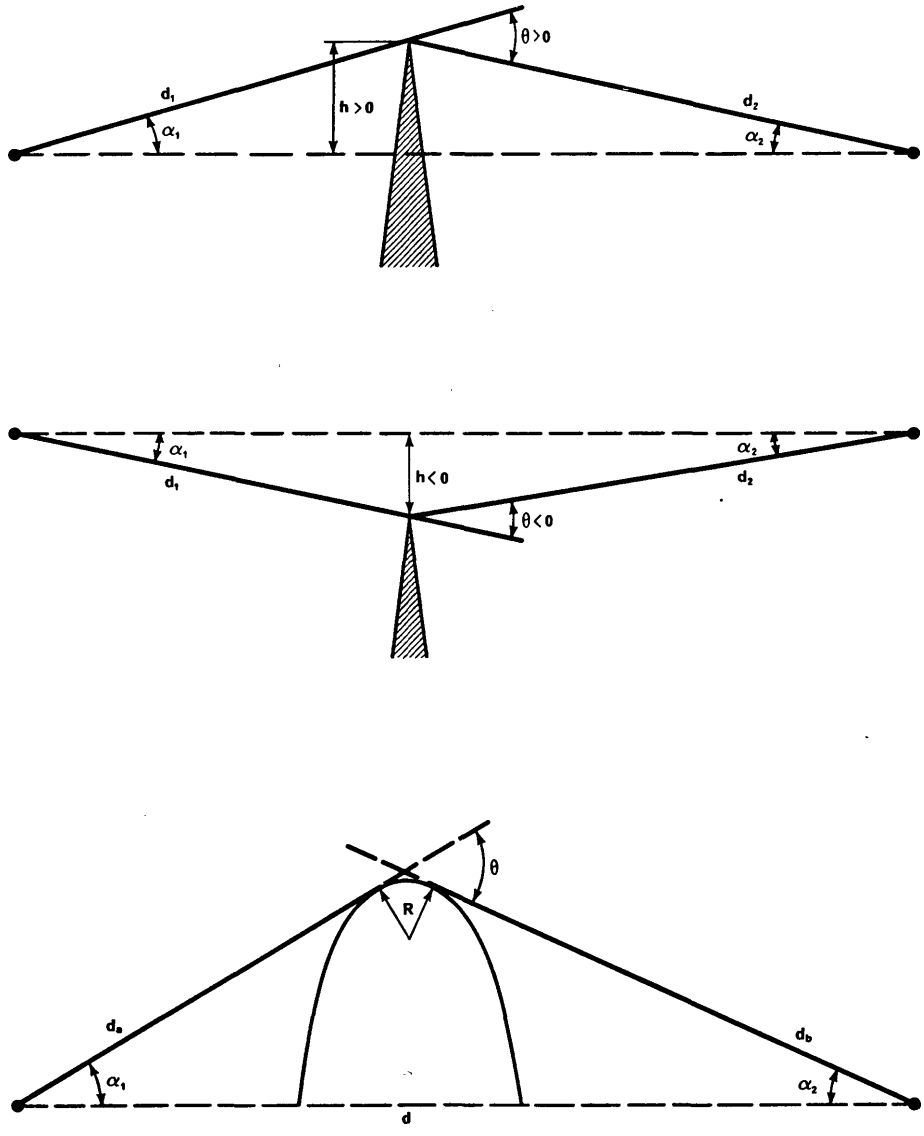



FIGURE 6 – *Eléments géométriques*

(Pour les définitions de $\theta$, $\alpha_1$, $\alpha_2$, $h$, $d$, $d_1$, $d_2$, $d_a$, $d_b$ et $R$, voir le § 3.1)

3.1 *Diffraction par des obstacles isolés*

3.1.1 *Obstacles à arête en lame de couteau*

Dans ce cas extrêmement schématisé (Fig. 6), on amalgame toutes les caractéristiques géométriques en une grandeur scalaire (sans dimension) qu'on désigne habituellement par $\nu$ et qui peut prendre diverses formes équivalentes, suivant les caractéristiques choisies:

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)} \tag{3.1}$$

$$\nu = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}} \tag{3.2}$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2h\,\theta}{\lambda}} \quad (\nu \text{ est du signe de } h \text{ et de } \theta) \tag{3.3}$$

$$\nu = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \alpha_2} \quad (\nu \text{ est du signe de } \alpha_1 \text{ et } \alpha_2) \tag{3.4}$$

où

$h$: hauteur du sommet de l'arête au-dessus de la droite joignant les deux extrémités du trajet; si le sommet est au-dessous de cette ligne, $h$ est négatif,

$d_1$, $d_2$: distances des deux extrémités à l'arête,

$d$: longueur de la liaison: $d = d_1 + d_2$,

$\theta$: angle de diffraction (radian); son signe est le même que celui de $h$; l'angle $\theta$ est supposé inférieur à environ 0,2 radian, soit approximativement 12°,

$\alpha_1$, $\alpha_2$: angles sous lesquels on voit, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée; $\alpha_1$ et $\alpha_2$ sont du signe de $h$ dans les relations ci-dessus, où $h$, $d_1$, $d_2$, $d$ et $\lambda$ sont exprimés dans la même unité.

La Fig. 7 donne, en fonction de $\nu$, l'affaiblissement $A$ (dB) dû à la présence de l'arête. Pour $\nu$ plus positif que $-1$ (au-delà de $-1$ dans le sens positif), on peut obtenir une valeur approchée au moyen de la formule:

$$A(\nu) = 6{,}4 + 20 \log \left(\sqrt{\nu^2 + 1} + \nu\right) \quad \text{dB}$$

L'erreur maximale est inférieure à 0,5 dB.

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

3.1.2 *Obstacle unique de sommet arrondi*

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

$$A = F(\nu) + G(\rho) + E(\chi) \tag{3.5}$$

*a)* L'affaiblissement $F(\nu)$ de Fresnel-Kirchhoff est représenté sur la Fig. 7 en fonction du paramètre sans dimension:

$$\nu = 2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[\frac{2(d_a + R \cdot \theta/2)(d_b + R \cdot \theta/2)}{\lambda \cdot d}\right]^{1/2} \tag{3.6}$$

$\lambda$ étant la longueur d'onde radioélectrique, $d_a$ et $d_b$ les distances respectives entre les points terminaux et leurs horizons sur l'élévation de terrain. $R$ est le rayon de courbure équivalent de l'accident de terrain situé entre les horizons et déterminé par le produit du rayon géométrique et du facteur multiplicatif $k$. Les distances et les longueurs sont exprimées dans les mêmes unités. Pour $R = 0$, l'expression (3.6) se réduit à l'expression (3.2).

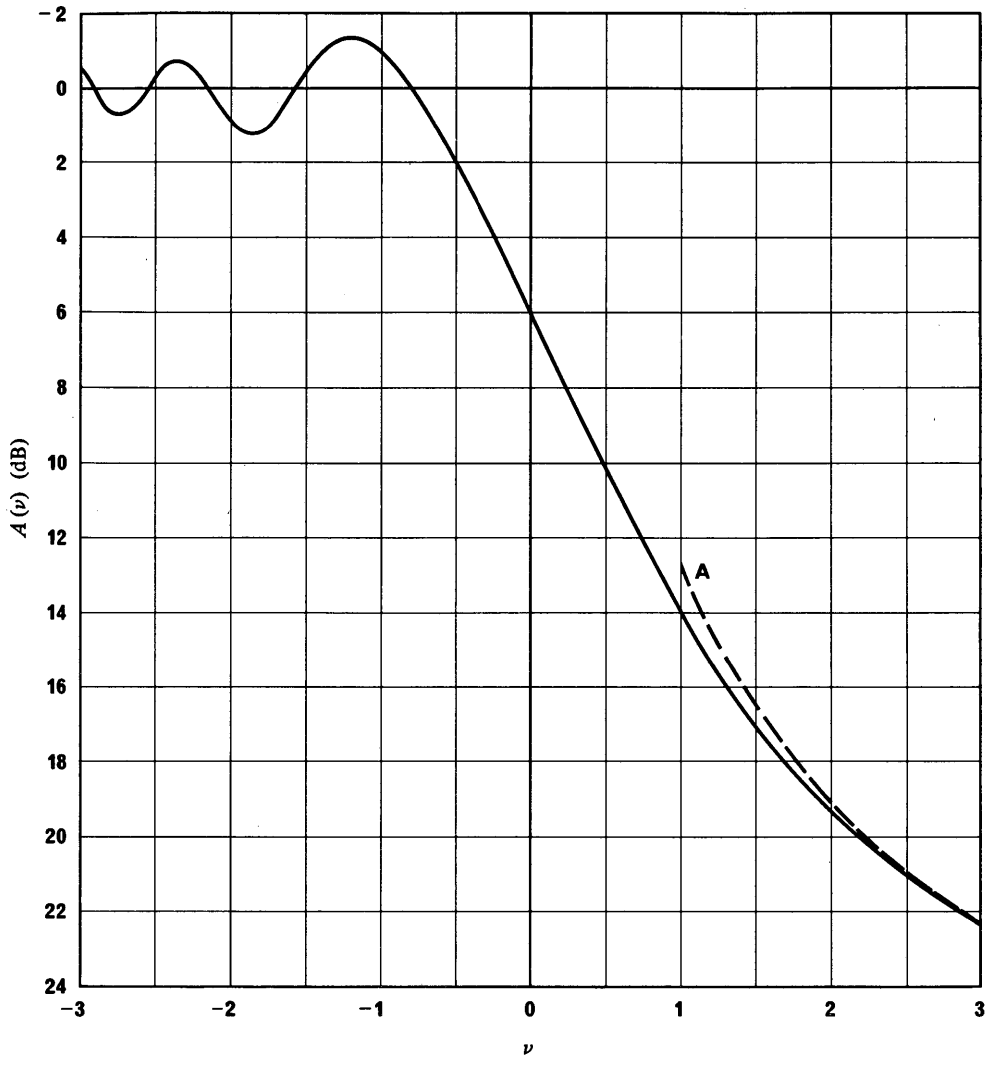



FIGURE 7 – *Diffraction sur une arête en lame de couteau – Affaiblissement de transmission par rapport à celui en espace libre*

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

*b)* L'affaiblissement $G(\rho)$ pour l'incidence sur la surface arrondie est donné par [Dougherty et Wilkerson, 1971]:

$$G(\rho) = 7{,}192\ \rho - 2{,}018\ \rho^2 + 3{,}63\ \rho^3 - 0{,}754\ \rho^4, \tag{3.7}$$

expression dans laquelle $\rho$ est donné par:

$$\rho^2 = \frac{d_a + d_b}{d_a d_b} \Big/ \left[\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^{1/3} \frac{1}{R}\right] \tag{3.8}$$

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

$$E(\chi) = \begin{cases} 12\ \chi \text{ pour } \chi < 4 \\ 17{,}1\ \chi - 6{,}2 - 20 \log \chi, \text{ pour } \chi \geqslant 4 \end{cases} \tag{3.9}$$

avec

$$\chi = \left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^{1/3} \theta \tag{3.10}$$

Pour $R = 0$, $\rho$ et $\chi$ s'annulent, et l'expression (3.5) se réduit à son premier terme. Pour $\theta = 0$, on a $\chi = 0$ et (3.5) représente alors l'affaiblissement pour l'incidence rasante sur la lame de couteau ou l'obstacle de forme arrondie.

La solution (3.5) résulte du premier terme d'un développement asymptotique selon les puissances inverses de *s*. Cela suppose que les antennes d'émission et de réception sont toutes deux éloignées de leur horizon respectif sur l'accident de terrain diffringent [Dougherty, 1969].

En d'autres termes:

$$s = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\left[d_a\, d_b\right]^{1/2} \geqslant 10 \tag{3.11}$$

et

$$\left[\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^{1/3}\Big/ R\right]^2 d_a\, d_b \geqslant 0{,}1 \tag{3.12}$$

Il est courant que ces conditions soient satisfaites pour les gammes de fréquences considérées dans le présent Rapport, pour une polarisation quelconque et pour un sol dont les constantes ont des valeurs que l'on rencontre normalement dans le cas de terrain irrégulier. La solution s'applique aussi à une Terre sphérique, sous réserve que les deux conditions (3.11) et (3.12) soient satisfaites; elle n'est pas applicable dans le cas spécial d'une polarisation verticale au-dessus de la mer, à moins que la fréquence ne soit supérieure à 1 GHz.

## 3.2 *Plusieurs obstacles et terrain irrégulier*

### 3.2.1 *Arêtes multiples en lame de couteau*

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

### 3.2.2 *Plusieurs obstacles de sommet arrondi*

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

### 3.2.3 *Terrain irrégulier*

On a mis au point des méthodes théoriques pour traiter la diffraction sur des modèles représentant des terrains de diverses caractéristiques [Furutsu, 1957 et 1959; Dougherty, 1970]. Certains trajets peuvent être traités comme franchissant une succession de crêtes assimilables à des lames de couteau ou à des cylindres, selon que leurs arêtes sont vives ou arrondies.

On a aussi mis au point une méthode théorique fondamentale pour traiter le problème de la propagation des ondes au-dessus d'un terrain irrégulier, au moyen d'intégrales [Hufford, 1952]. Cette méthode a été suivie pour établir les diagrammes de rayonnement dans l'espace en fonction de l'angle de site de départ et pour déterminer la position optimale d'une antenne de station côtière à ondes décamétriques située sur une plage en pente [Ott, 1971]

On a introduit un modèle empirique de propagation par diffraction [Blomquist et Ladell, 1975; Blomquist, 1975]. Dans ce modèle, l'affaiblissement de diffraction pour un profil de terrain et une fréquence particuliers est d'abord calculé séparément pour un modèle de diffraction sur une Terre sphérique équivalente et pour un modèle de diffraction sur plusieurs lames de couteau, puis les affaiblissements obtenus avec ces deux derniers modèles sont combinés par application d'une relation mathématique simple.

Une méthode applicable aux petits pourcentages du temps est décrite dans le Rapport 569-1.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASSIS, M. S. [mars 1971] A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-19, 292-295.

BLOMQUIST, A. [1975] Seasonal effects on ground wave propagation in cold regions. *Journ. of glaciology*, Vol. 15, **73**.

BLOMQUIST, A. et LADELL, L. [1975] Propagation and calculation of transmission loss in different types of terrain (in INCE, A. N., ed. Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media. AGARD Conference Proceedings, N° 144, article 32).

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

DEYGOUT, J. [juillet 1966] Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-14, 480-489.

DOUGHERTY, H. T. [1969] An approximate closed-form method of solution for the diffraction of radio-waves by irregular surfaces. Résumés d'exposés, Engineering B. Ord. N° 69-4358.

DOUGHERTY, H. T. [1970] Diffraction by irregular apertures. *Radio Science*, 5, **1**, 55-60.

DOUGHERTY, H. T. et WILKERSON, R. E. [1967] Determination of antenna height for protection against microwave diffraction fading. *Radio Science*, Vol. 2 (nouvelle série) **2**, 161-165.

FURUTSU, K. [1957 et 1959] Wave propagation over an irregular terrain, I, II, et III. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 4, 16 (1957), Vol. 4, 18 (1957) et Vol. 6, 23 (1959).

FURUTSU, K. [janvier 1962] Effect of ridge, cliff and bluff at a coastline on ground-waves. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 9, 41.

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

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

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

NBS [1967] National Bureau of Standards, Note technique N° 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va (Etats-Unis d'Amérique).

OTT, R. H. [1971] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain II. *Radio Science*, 6, **4**, 429-435.

## AVIS 527

## CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DE LA SURFACE DE LA TERRE *

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que la propagation de l'onde de sol dépend surtout des caractéristiques électriques du sol, y compris de la végétation, et que la mesure dans laquelle les couches inférieures influent sur les constantes électriques de la Terre dépend de la profondeur à laquelle pénètre l'énergie électrique;

*b)* que l'on a besoin de connaître les valeurs de la permittivité (constante diélectrique) et de la conductivité en fonction de la fréquence pour divers types de surfaces;

*c)* que l'on a besoin de connaître la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence;

*d)* que l'on a besoin de connaître les valeurs de l'affaiblissement sur un terrain boisé afin de tenir compte de l'absorption de l'énergie par les arbres,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

**1.** que, pour calculer le champ de l'onde de sol aux fréquences intéressées et dans les conditions indiquées, on emploie les courbes de l'Annexe I au présent Avis.

## ANNEXE I

Il convient, au sujet des courbes, de noter spécialement ce qui suit:

**1.** Les valeurs de la permittivité (constante diélectrique) et de la conductivité données par la Fig. 1 pour divers types de sols indiquent la gamme approximative de valeurs que l'on peut observer dans diverses conditions; cependant, dans des situations extrêmes, on peut observer des valeurs se situant en dehors de cette gamme. Dans les zones fertiles très humides, on relèvera des valeurs de conductivité beaucoup plus fortes, alors que, dans les régions montagneuses ou arctiques, la conductivité peut descendre à $10^{-5}$ S/m aux fréquences inférieures à 100 MHz. De même, quand le sol est recouvert de neige, on peut trouver des valeurs de permittivité plus basses que celles qu'indique la courbe E de la Fig. 1. La conductivité des lacs et des rivières augmente avec la teneur de l'eau en impuretés.

**2.** Aux fréquences basses, sauf pour l'eau de mer, il y a lieu, comme le montre la Fig. 2, de tenir compte des couches d'une profondeur de 100 m, sinon davantage. Cela est d'une importance particulière lorsque les couches supérieures ont la conductivité la plus faible et que l'énergie peut donc pénétrer plus facilement aux niveaux inférieurs. De tels cas se présentent, par exemple, pour les lacs et zones océaniques recouverts de glace.

**3.** On trouvera une description complète de l'affaiblissement dû aux terrains boisés dans le Rapport 236-4.

* Voir aussi le Rapport 229-3.

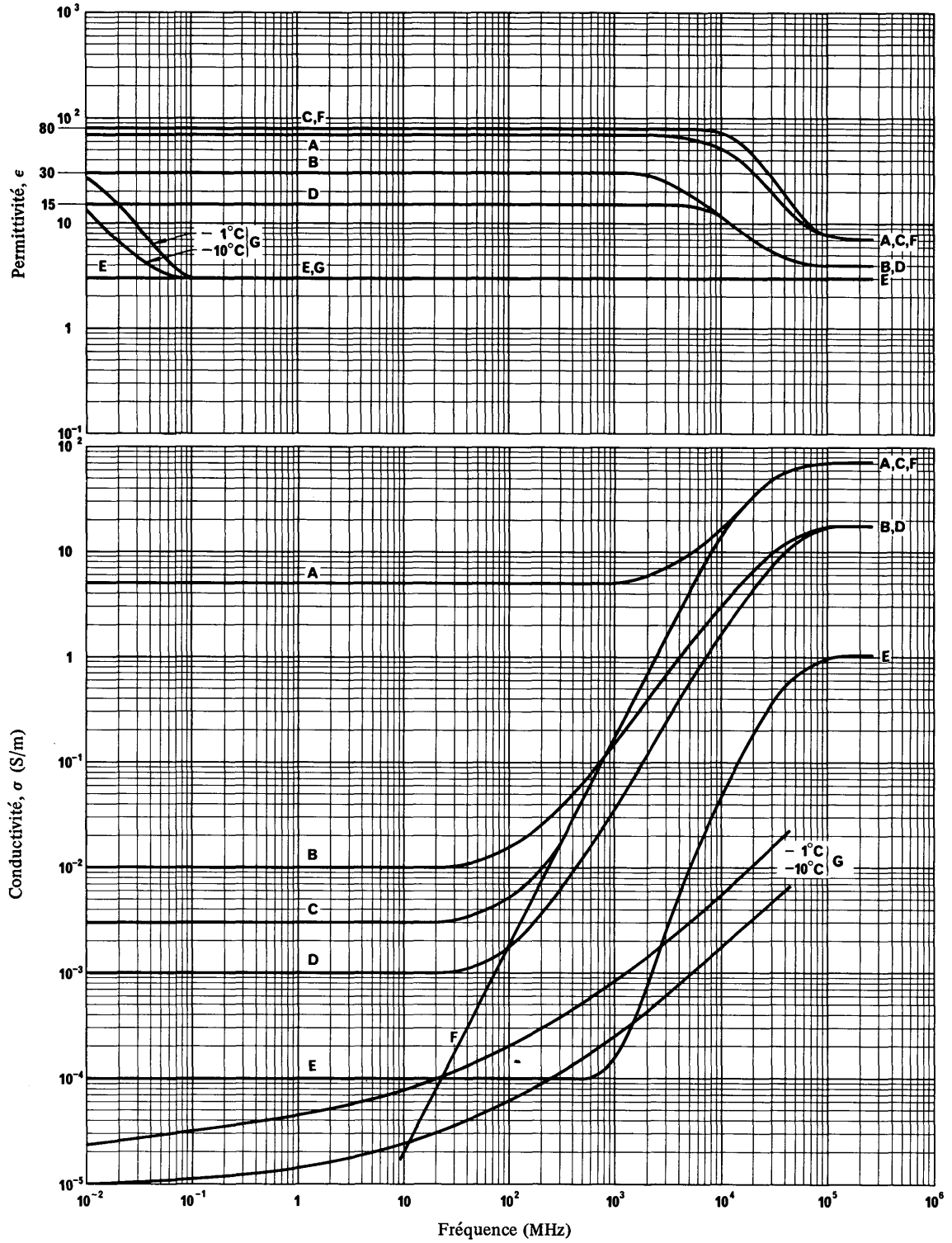



FIGURE 1 – *Permittivité, ε, et conductivité, σ, en fonction de la fréquence*

A: Eau de mer (salinité moyenne), 20° C
B: Sol humide
C: Eau douce, 20° C
D: Sol moyennement sec
E: Sol très sec
F: Eau pure, 20° C
G: Glace (eau douce)

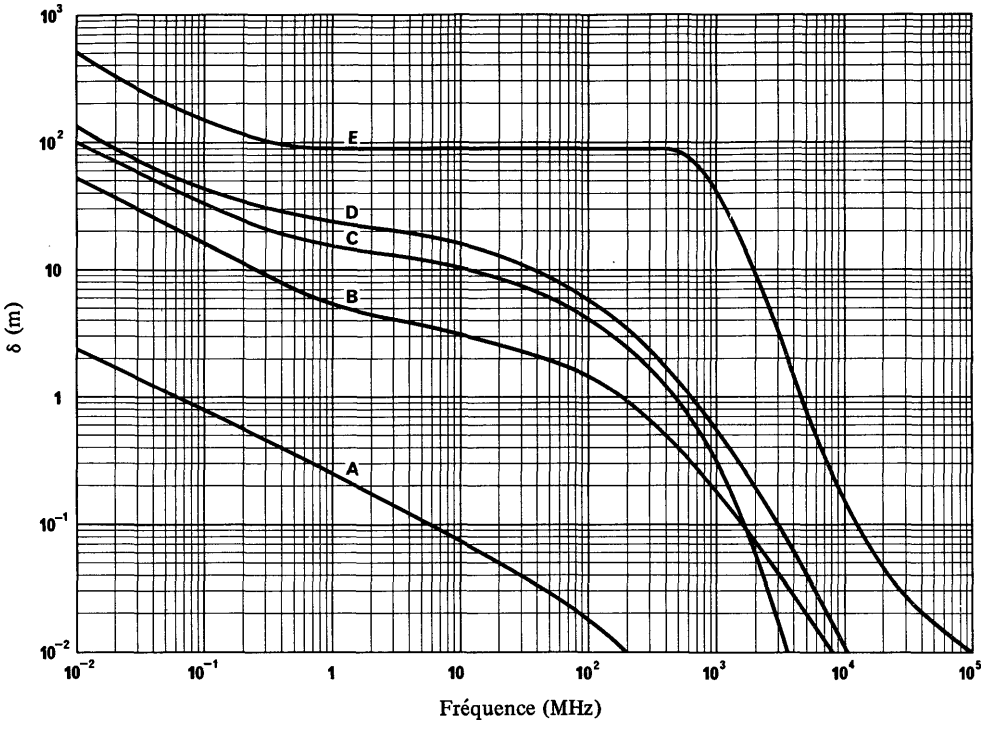



FIGURE 2 – *Profondeur de pénétration δ en fonction de la fréquence*

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

---

RAPPORT 229-3

## CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DE LA SURFACE DE LA TERRE

(Question 1-2/5)

(1959 - 1963 - 1970 -1974 - 1978)

### 1. Introduction

Ce Rapport analyse 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 calcul de la propagation radioélectrique: on trouvera dans les documents de la XI[e] Assemblée plénière du CCIR, 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:

$$\varepsilon' = \varepsilon - j\, 18\,000\, \sigma/f = \varepsilon - j\, 60\, \sigma\lambda \qquad (1)$$

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

On trouvera dans l'Avis 527 des valeurs représentatives des constantes du sol en fonction de la fréquence.

## 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 formation 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 $10^{-2}$ S/m; or, on a pu montrer que, pour l'argile séchée, la conductivité peut descendre jusqu'à $10^{-4}$ S/m, c'est-à-dire à une valeur du même ordre que celle du granit.

### 3.2 *Teneur en humidité*

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

Par exemple, des mesures faites en Inde en ondes hectométriques [CCIR, 1974-78] ont montré que les champs relevés pendant la mousson étaient presque les mêmes que pendant la saison sèche, malgré une variation considérable de la teneur du sol en humidité.

Toutefois, un même sol peut présenter des variations d'humidité considérables d'un lieu à un autre, par suite de différences entre les formations géologiques générales, auxquelles correspond un écoulement plus ou moins rapide des eaux.

### 3.3 *Température*

Des mesures de laboratoire portant sur les constantes du sol ont montré que, en ondes kilométriques, le coefficient de température de la conductivité est de l'ordre de 2% par degré centigrade; ce coefficient est négligeable dans le cas de la constante diélectrique. Au point de congélation de l'eau, on observe généralement une substantielle diminution de la valeur des deux constantes. Bien que les variations dont il s'agit soient appréciables, il convient de se rappeler que la température varie annuellement entre des limites de plus en plus serrées lorsque la profondeur augmente, aussi est-il vraisemblable que la température n'a une influence notable qu'en ondes décamétriques, 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 que les constantes sont avec la fréquence dans une relation qui dépend sensiblement de la teneur en humidité du sol. Dans le cas de l'eau douce et de l'eau de mer, on peut se fonder sur les renseignements contenus dans l'ouvrage [Saxton et Lane, 1952] pour calculer les valeurs correspondant à une fréquence quelconque.

### 3.5 *Formation 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 formation 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 *Absorption de l'énergie par des objets à la surface de la Terre*

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

On obtient des valeurs particulièrement élevées de l'affaiblissement linéique lorsque la transmission se fait au-dessus d'un terrain boisé à des fréquences supérieures à environ 30 MHz [Blomquist, 1958; Rice, 1971; Saxton et Lane, 1955; Tamir 1967]. Cet affaiblissement peut être encore plus grand lorsque les arbres sont couverts de neige mouillée ou que leurs feuilles sont mouillées par la pluie. Cette question est traitée plus en détail dans le Rapport 236-4.

## 4. Pénétration et étalement des ondes

4.1 La mesure dans laquelle les couches profondes du sol influent sur la valeur de ses constances électriques dépend de la profondeur de pénétration de l'énergie radioélectrique, $\delta$, 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. L'Avis 527 indique la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence pour différents types de sol et d'eau.

4.2 L'énergie radioélectrique reçue en un point donné ne s'est pas propagée uniquement le long du trajet qui relie directement ce point à l'émetteur; elle s'est propagée également sur un grand nombre de trajets indirects répartis de part et d'autre du précédent. Il faut donc considérer les constantes du sol, non seulement le long du trajet 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 $\lambda$ la longueur d'onde.

## 5. Méthodes de mesure des constantes du sol

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

### 5.1 *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.

### 5.2 *Mesure de la résistivité du sol au moyen 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 peut déterminer l'épaisseur de la couche superficielle du sol ou la hauteur de la nappe aquifère.

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

### 5.3 *Méthode fondée sur 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 à polarisation elliptique, le grand axe de l'ellipse étant 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 doublet orientable. Lorsque la surface du sol n'est pas horizontale, il convient de mesurer l'angle d'inclinaison vers l'avant par rapport à la normale à la surface et non par rapport à la verticale. On a indiqué que, si cette méthode est mise en œuvre de façon appropriée, elle permet de mesurer les constantes du sol dans une gamme de fréquences allant de 100 kHz à 40 MHz.

La méthode fondée sur l'inclinaison des ondes a été employée avec succès pour mesurer les inhomogénéités de la surface terrestre dans le sens horizontal [Blomquist, 1975]. On commet toutefois des erreurs lorsque les mesures sont faites au voisinage de régions caractérisées par d'importants gradients horizontaux de conductivité, comme dans le cas du passage de la terre à la mer ou du passage d'un sol meuble à un sol marécageux.

### 5.4 *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 obtenus, d'une part, avec des courbes de propagation tirées de théories rigoureuses et, d'autre part, de méthodes semi-empiriques considérées comme acceptables dans le cas considéré. La méthode est applicable à toutes les fréquences.

5.5 *Mesure de l'affaiblissement en fonction de la profondeur au-dessous de la surface du sol*

Les constantes du sol peuvent se déterminer en mesurant l'affaiblissement linéique du champ avec un récepteur qu'on abaisse au-dessous de la surface de la Terre dans un puits ou tout autre trou approprié [Kachprovski, 1958].

5.6 *Mesure de la variation de phase (en ondes kilométriques)*

Ayant mesuré la variation de la phase d'une onde de sol en fonction de la distance, on peut déduire de ce déphasage linéique 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.

5.7 *Mesure de la dispersion des ondes due aux bruits atmosphériques (en ondes kilométriques)*

Lorsqu'une impulsion, telle que celles produites par certaines décharges atmosphériques, 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 la gamme des ondes kilométriques et pour des trajets dont la longueur est comprise entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de kilomètres.

5.8 *Mesure du coefficient de réflexion (en ondes métriques)*

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 la gamme des ondes métriques.

## 6. 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 aux 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 formation 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 formation générale du terrain, mais seulement sur une surface relativement peu étendue. Cette méthode est simple et commode à mettre en œuvre; c'est peut-être celle qui convient le mieux dans les cas où l'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 trajet, 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 zones à fort gradient de conductivité ou 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 gammes des ondes kilométriques et hectométriques ou une distance qui soit grande par rapport aux dimensions de l'antenne pour la gamme des ondes décamétriques. La méthode devient assez peu précise au-dessous de 100 kHz, car on a affaire alors à de petits angles d'inclinaison. Du fait de la variation de l'inclinaison en fonction de la hauteur au-dessus de la surface du sol, cette méthode n'est utile que pour des fréquences inférieures à environ 40 MHz. Elle peut être utilisée pour la détermination de l'affaiblissement le long du trajet si l'on procède à une série de mesures le long de ce trajet.

La méthode par mesure de l'affaiblissement de l'onde de sol est l'une des plus complètes, étant donné qu'elle tient compte de tous les facteurs en jeu. Comme la méthode décrite à l'alinéa 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 trajet considéré ou pour un trajet de caractéristiques très voisines. La méthode se prête mal à la mesure précise des constantes du sol sur certaines zones peu étendues.

La méthode de la variation de phase tient compte, elle aussi, de tous les paramètres en jeu; il semble, en outre, que, en ce qui concerne les trajets en sol inhomogène, elle puisse donner des renseignements plus détaillés que n'en donne la méthode de l'affaiblissement. Elle a cependant l'inconvénient d'exiger une liaison auxiliaire en ondes métriques ou décimétriques pour fournir une référence de phase au récepteur.

Il faut prendre certaines précautions, en appliquant ces trois dernières méthodes, si l'on veut que le champ mesuré ne soit pas influencé par les ondes ionosphériques ou par une haute végétation, à moins évidemment qu'on veuille justement étudier une telle influence.

Les résultats fournis par la méthode du coefficient de réflexion ne sont corrects que dans une petite zone de terrain autour du point de mesure; d'autre part, comme on ne peut employer cette méthode qu'en ondes métriques, 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, en ondes kilométriques; elle trouve, par conséquent, sa principale application dans les systèmes de navigation en ondes kilométriques. Elle offre l'avantage de ne pas exiger d'émetteur, mais présente aussi l'inconvénient de ne permettre de recueillir des données que très lentement, du fait que les décharges atmosphériques appropriées sont rares et imprévisibles. Cette méthode peut s'appliquer quelle que soit la distance, car l'emploi d'impulsions permet de distinguer entre l'onde de sol et l'onde d'espace. Elle exige un équipement plus compliqué et des calculs mathématiques plus complexes que les autres méthodes. Il semble qu'on doive la perfectionner encore pour surmonter certaines des difficultés indiquées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLOMQUIST, A. [1958] Local ground-wave field strength variations in the frequency range 30-1000 MHz. Proc. Conf. on Electromagnetic Wave Propagation, Bruxelles, 127.

BLOMQUIST, A. [1975] Seasonal effects on ground-wave propagation in cold regions. *Journal of Glaciology,* Vol. 15, **73**.

KACHPROVSKI, V. [1958] The propagation of radio waves and conductivity (en russe). *Radio Journal of U.S.S.R.* [juin 1959]. Traduction en anglais du National Bureau of Standards T1-60 [juin 1959].

RICE, P. L. [1971] Some effects of buildings and vegetation on VHF/UHF propagation. Conf. Proc. of the 1971 IEEE Mountain-West Conf. on Electromagnetic Compatibility, Tucson, Arizona.

SAXTON, J. A. et LANE, J. A. [octobre 1952] Electrical properties of sea water. *Wireless Engineer.*

SAXTON, J. A. et LANE, J. A. [1955] VHF and UHF reception. *Wireless World,* **61**, 229.

TAMIR, T. [1967] On radio-wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. Ant. Prop.,* Vol. 15, **6**, 806-817.

*Documents du CCIR*

[1974-78] 5/257 (Inde).

---

RAPPORT 236-4

# INFLUENCE DES IRRÉGULARITÉS DE TERRAIN ET DE LA VÉGÉTATION SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

(Programme d'études 1A-1/5)

(1951 - 1953 - 1956 - 1959 - 1963 - 1966 - 1970 - 1974 - 1978)

## 1. Introduction

Le présent Rapport a pour objet de décrire 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.

On ne peut énoncer aucun principe général quant à l'influence du terrain et de la végétation sur la propagation. Cette influence est une fonction complexe de la fréquence, des constantes du sol, des variations troposphériques, du tracé, du trajet, de la saison et de la densité de la végétation.

## 2. Caractéristiques générales et modèles schématiques

### 2.1 *Caractéristiques électriques du terrain*

La propagation troposphérique dépend en principe des caractéristiques électriques du sol, comme l'expose en détail le Rapport 229-3. 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 entre l'effet de l'inhomogénéité des constantes du sol et l'effet des accidents du terrain, lequel est prépondérant quand ces derniers sont grands par rapport à la longueur d'onde.

2.2 *Interaction du terrain et de la troposphère*

Les textes de la section 5C du présent Volume 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 le tracé du trajet considéré et la prépondérance de différents mécanismes de propagation associés à la stratification de la distribution de l'indice de réfraction.

2.3 *Comparaison entre modèles schématiques et caractéristiques du terrain*

Immédiatement au-delà de l'horizon radioélectrique d'une antenne d'émission, les champs radioélectriques observés proviennent d'une diffraction sur des crêtes, sur 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 mentionnées dans la présente section. Les champs peuvent être voisins de leur niveau en espace libre, ce qui traduit un affaiblissement linéique petit (voir le Rapport 715). L'autre cas extrême est celui d'une diffraction sur une Terre sphérique régulière (voir le Rapport 715). Il lui correspond un champ radioélectrique peu intense, dont le niveau est vite dépassé, au-delà de l'horizon d'une antenne d'émission, par celui des champs créés par réflexion sur des couches atmosphériques élevées ou par des ondes radioélectriques diffusées vers l'avant.

On a mis au point des méthodes théoriques pour schématiser certaines particularités du terrain telles que les falaises plus ou moins à pic et des obstacles à arête en lame de couteau qui interceptent un trajet de propagation.

Les conditions dans lesquelles de tels modèles schématiques donnent satisfaction sont examinées dans le Rapport 715.

Cependant, dans la plupart des cas de propagation au-dessus de terres, on a constaté qu'il est très difficile de tenir compte de la rugosité et des irrégularités caractéristiques du terrain et d'éléments environnants capricieux tels que la végétation, les constructions, les ponts et les lignes de transport électriques.

## 3. Précision des prévisions

Le paramètre le plus important qui permet de distinguer entre les différents profils de terrain dans le plan d'un grand cercle, pour des trajets transhorizon d'une longueur donnée, est généralement la distance angulaire $\theta$. 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 antennes ne soient pointées à un grand angle de site.

Entre 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, on trouve inévitablement des écarts d'affaiblissement. S'il s'agit d'une liaison de point à point, on les admet comme inhérents à l'erreur de prévision. En revanche, dans la plupart des applications à la radiodiffusion et aux services mobiles, ces écarts d'affaiblissement entre trajets sont délibérément pris en compte lors du processus de prévision plutôt qu'assimilés à l'erreur de prévision.

Des mesures [Wise, 1965] ont révélé qu'il existe une étroite corrélation entre les niveaux du champ mesurés dans des canaux en ondes décimétriques dont les fréquences sont espacées entre elles de 200 MHz au maximum, quand ils sont émis d'emplacements adjacents. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,9 sur terrain plat et de 0,8 sur terrain vallonné.

Des mesures similaires faites à des fréquences comprises entre 100 et 1000 MHz ont montré que, au-dessus d'un terrain moyen, le coefficient de corrélation est encore de 0,7 même si le rapport des fréquences est de 1 à 3. En revanche, quand les émetteurs sont situés en des emplacements très éloignés les uns des autres, le coefficient de corrélation entre les champs est presque nul au point de réception, même s'il n'y a pratiquement pas d'espacement entre les fréquences. Il est commode, pour la plupart des radiocommunications entre points fixes, de prévoir simplement la distribution cumulative, dans le temps, de la puissance reçue en provenance de sources de signaux utiles et brouilleurs, sur la base des valeurs estimées de la corrélation [NBS, 1967]. Comme la puissance des signaux utiles et brouilleurs varie généralement dans le même sens d'un jour ou d'une saison à l'autre, la distribution cumulative, dans le temps, du rapport signal/bruit s'étend sur un intervalle un peu plus étroit que si cette corrélation n'était pas positive.

## 4. Terrain montagneux

Certains trajets peuvent être traités comme s'ils franchissaient une succession de crêtes assimilables à des arêtes en lame de couteau ou à des cylindres suivant qu'elles sont plutôt vives ou plutôt arrondies. Le Rapport 715 contient des suggestions pour le traitement à adopter dans de tels cas.

Sur les trajets de grande longueur, la diffusion troposphérique peut se produire bien au-dessus d'une crête de montagne et il faut alors composer l'onde diffusée avec l'onde diffractée. Si les antennes d'émission et de réception sont placées plus haut que le terrain environnant, certaines ondes peuvent être réfléchies, tant avant qu'après diffraction. Quand une onde rase le sol, il peut se produire un affaiblissement de transmission supplémentaire, parce que la conductivité du sol est finie [Furutsu, 1957 et 1959].

Les crêtes de montagne peuvent abaisser l'affaiblissement de transmission et les évanouissements franchement au-dessous des niveaux auxquels on pourrait s'attendre en l'absence d'obstacle. Cela se produit lorsque le trajet direct n'est pas optiquement rectiligne, à condition que l'émetteur et le récepteur soient visibles chacun de la crête de la montagne. Ce phénomène est appelé gain d'obstacle. 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, en ne faisant intervenir que la diffraction et une atmosphère radioélectrique normale (courbes de propagation des Atlas du CCIR), ou si l'on tient compte aussi de la diffusion et de la superréfraction (courbes de l'Avis 370-3). Ce dernier cas se présente si l'on a à comparer les propagations sur deux trajets voisins qui ont des distances et des hauteurs d'antenne du même ordre de grandeur, mais dont un seulement est sujet à diffraction sur une crête montagneuse, tandis que l'autre ne franchit pas d'obstacle. Des mesures effectuées dans ces conditions ont confirmé l'existence de tels gains [Dickson et autres, 1953; Norton et autres, 1955; Iwai, 1959; Fukami et autres, 1961; Kirby et autres, 1955].

On notera en outre que la direction où le rayonnement reçu est le plus intense ne se trouve pas forcément dans le plan du grand cercle passant par l'émetteur et le récepteur, mais peut s'en écarter sensiblement, surtout lorsque le lieu de réception est très proche (quelques kilomètres) de la crête diffringente. Cette particularité implique 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 caractéristiques de diffraction ou de diffusion de la crête en dehors de ce plan. Toutefois, si l'obstacle montagneux est peu éloigné du trajet du grand cercle, il n'introduit plus un gain notable [Kirby et autres, 1955].

De petites irrégularités de la crête d'une chaîne montagneuse causent dans le champ dû à la diffraction une inhomogénéité spatiale qui donne lieu elle-même à une répartition spatiale des évanouissements. Le champ dû à la diffraction sur la crête se trouve ainsi élargi, et il en résulte une dégradation du gain d'antenne équivalent et une distorsion en fréquence et en phase du signal [Troitsky, 1975 et 1977].

Lorsque la propagation a lieu au-dessus de très hautes crêtes montagneuses, 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. De même, il peut se présenter des différences marquées entre les conditions météorologiques régnant sur les deux versants d'une chaîne de montagnes, les conditions qui donnent naissance aux évanouissements n'étant éventuellement réalisées que sur une moitié du trajet à la fois.

Des études théoriques et expérimentales menées en U.R.S.S. [Troitsky, 1976 et 1977] ont montré que les ondes décimétriques et centimétriques peuvent se propager dans la zone d'ombre de chaînes de montagnes, par réfraction dans la couche diélectrique formée par leur couverture neigeuse. Ce phénomène entraîne parfois une nette intensification du champ dans l'ombre des pics et des crêtes par rapport au champ dû à la seule diffraction.

Ces circonstances peuvent limiter les effets de la troposphère sur les composantes individuelles de l'onde diffractée et tendent à réduire la profondeur des évanouissements qui se produisent à un point de réception où le champ est intense [Dickson et autres, 1953; Kirby et autres, 1955; Stark, 1964; Okumura et Hara, 1965].

## 5. Petites et moyennes irrégularités du terrain

La plupart des irrégularités du profil d'un terrain ne sont pas constituées par des obstacles isolés [NBS, 1967; Beckmann et Spizzichino, 1963; Thiessen, 1964], dont les effets ne sont pas influencés par des collines et des vallées voisines. L'analyse descriptive des données de radiodiffusion consignées dans le Rapport 239-4 et dans l'Avis 370-3 montre que, en première approximation, on peut caractériser ces irrégularités par la différence $\Delta h$ entre les hauteurs de terrain qui sont dépassées sur 10% et 90% d'un trajet de propagation dans son segment compris entre 10 km et 50 km à partir de l'émetteur. Ce paramètre $\Delta h$ est défini dans l'Avis 370-3.

Il ressort de l'expérience qu'on peut améliorer les prévisions de la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission, dans la zone desservie par un émetteur de radiodiffusion, en utilisant les paramètres supplémentaires mentionnés dans le Rapport 239-4, qui complètent les paramètres appliqués dans les prévisions en question. On a montré [Thiessen, 1964; UER, 1965] qu'on peut encore améliorer la précision des prévisions en faisant intervenir empiriquement la pente moyenne du terrain au voisinage du point de réception. Ces travaux reposent sur le principe qu'on obtient un champ plus intense en ce point lorsque la direction d'arrivée de l'onde 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 segment du trajet de propagation affecté par la diffusion (due aux bâtiments, aux arbres, etc.) est d'autant plus petit que cet angle est plus grand.

## 6. Terrain boisé

Théoriquement, la couverture végétale du sol en forêt dense ou en jungle est assimilable à la couche III de la Fig. 1 qui est faiblement diélectrique, donc comporte des pertes [Wait et autres, 1974; Tamir, 1967 et 1977; Sachs et autres, 1968]. L'épaisseur de la couche, $h$, est la hauteur équivalente de la végétation au-dessus du sol. Cette couche est caractérisée par une valeur moyenne semi-empirique de sa constante diélectrique complexe,

$\varepsilon' = n^2$, où $n$ est l'indice de réfraction correspondant, $n_r + jn_i$, avec $n_r \approx 1$ et $n_i \ll 1$. Pour les trajets de propagation directs de longueur $d$ à l'intérieur de la couche, la formule de l'affaiblissement de transmission contient un facteur supplémentaire, exp. $(-k_0 d\sqrt{\varepsilon'})$, qui s'ajoute à l'affaiblissement en $1/d^2$, dans lequel $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, $\lambda_0$ étant la longueur d'onde en espace libre.

La réflexion et la réfraction des ondes radioélectriques à la surface de séparation air-forêt donnent naissance aux trajets de propagation indiqués à la Fig. 1. Sur des distances plus longues, en l'absence d'onde ionosphérique, seule l'onde latérale est à considérer.

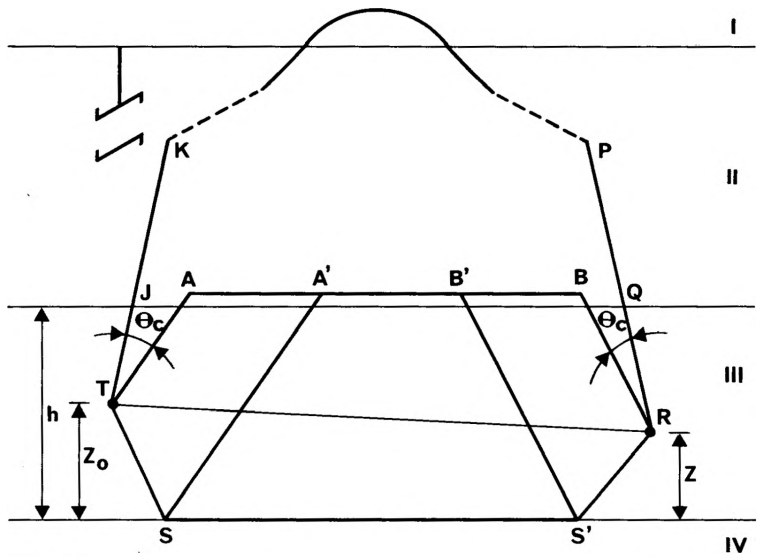



FIGURE 1 – *Propagation au-dessus d'un terrain boisé schématisé par un modèle*

T-R : onde directe; T-S-A'-B-R, T-A-B'-S'R : ondes réfléchies;
T-A-B-R : onde latérale; T-J-K-P-Q-R : onde ionosphérique.

Les couches I, II, III, IV représentent respectivement l'ionosphère, la troposphère, la forêt et le sol.

Selon le mécanisme de propagation théorique, schématisé par des rayons, de l'énergie rayonnée par l'émetteur T, supposé placé à une hauteur $z_0 < h$, se propage sous un angle rasant $\theta_c =$ arc sin $(1/\sqrt{\varepsilon'})$, qui est l'angle critique pour la réflexion interne totale sur la surface supérieure de la couche. Cette énergie est couplée à celle de l'onde latérale, dont le champ diminue selon une loi en $1/d^2$ et la puissance surfacique en $1/d^4$, $d$ étant la distance horizontale. L'onde latérale perd continuellement de l'énergie dans la végétation sous l'angle $\theta_c$, et le rayon utile (B-R, Fig. 1) arrive au récepteur R à la hauteur $z < h$. On trouvera une théorie précise sur le champ de l'onde latérale dans [Tamir, 1977]. La validité de ce modèle de couche homogène est limitée par la longueur d'onde du rayonnement. Au-dessous de 2 MHz environ, la hauteur de la forêt est bien inférieure à $\lambda_0$, de sorte que la forêt a peu d'effet sur l'onde de sol. Cela est confirmé par de nombreuses données empiriques [Wait et autres, 1974]. Au-dessus de 200 MHz environ, la végétation ne peut plus être considérée comme homogène sur des distances de l'ordre de $\lambda_0$ [Tamir, 1977]. Toutefois, pour une forêt à feuilles caduques dans une zone humide située en Inde, des mesures faites entre 50 et 800 MHz confirment la relation générale de la puissance surfacique du signal en $1/d^4$ [Swarup et Tewari, 1975]. Des travaux antérieurs effectués par plusieurs chercheurs [Saxton et Lane, 1955; Josephson et Blomquist, 1958; Head, 1960; Herbstreit et Crichlow, 1964] avaient suggéré que, dans la gamme de fréquences de 30 à 2000 MHz, l'affaiblissement linéique supplémentaire moyen au-dessus d'un terrain boisé, exp. $(-k_0 d\sqrt{\varepsilon'})$ (dB/m), est donné par la Fig. 2. On peut s'attendre à une variation considérable de ces valeurs en fonction de la densité de la végétation, de la teneur en humidité des feuilles et de la présence de neige sur les branches. Effectivement, aux fréquences les plus élevées de la courbe, on a mesuré des valeurs supérieures de 0,1 dB/m à celles de la courbe.

Le modèle décrit ci-dessus s'applique au champ créé par l'émetteur en des points situés dans la forêt. Pour des points situés à l'extérieur de la forêt ou séparés de l'émetteur par une clairière, le champ peut être estimé à l'aide d'une formule plus générale [Tamir, 1977]. Le cas où l'émetteur et le récepteur sont installés au-dessus du sommet de la forêt, par exemple dans les systèmes de radiodiffusion et les faisceaux hertziens, n'est pas examiné dans le présent Rapport (voir le Rapport 239-4).

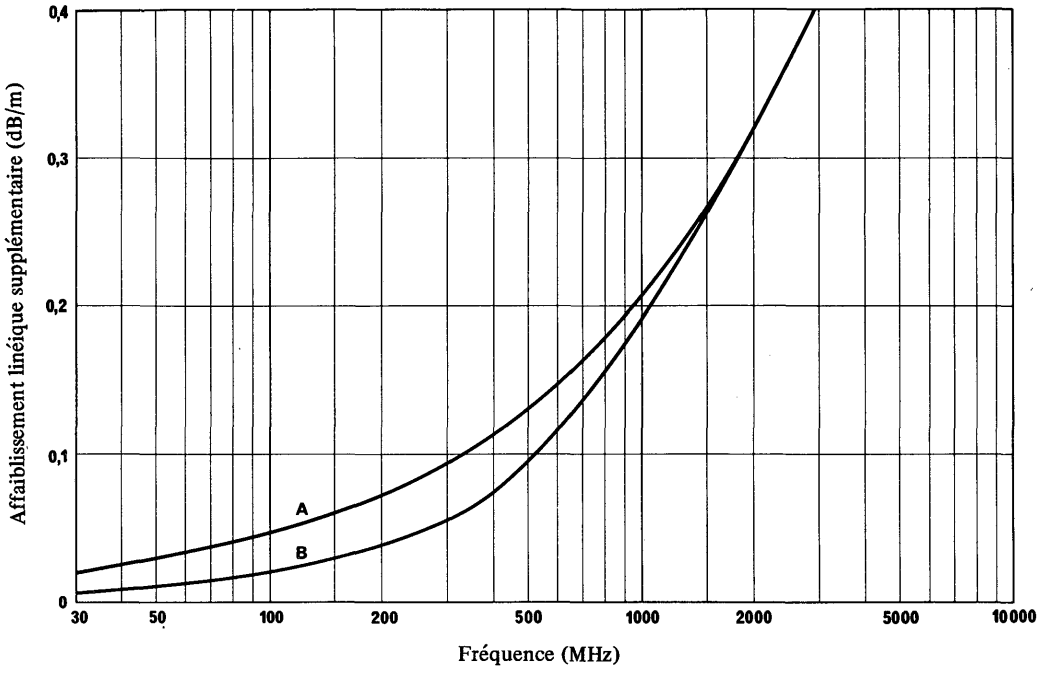



FIGURE 2 – *Affaiblissement linéique supplémentaire au-dessus d'un terrain boisé*

A: en polarisation verticale
B: en polarisation horizontale

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. [1963] *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces.* Pergamon Press, Londres, New York, Paris.

DICKSON et autres [août 1953] *Proc. IRE.*

FUKAMI, T. et autres [décembre 1961] Propagation measurements on long mountain diffraction paths, etc. *Elect. Comm. Lab. Journ. NTT*, Japon, Vol. 10, 2430.

FURUTSU, K. [1957 et 1959] Wave propagation over an irregular terrain, I, II et III. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 4, **16** (1957), Vol. 4, **18** (1957) et Vol. 6, **23** (1959).

HEAD, H. T. [1960] The influence of trees on television field strengths at UHF. *Proc. IRE*, **48**, 1016.

HERBSTREIT, J. W. et CRICHLOW, W. Q [1964] Measurement of the attenuation of radio signals by jungles. *Radio Science*, **68D**, 903.

IWAI, F. et autres [septembre 1959] Radio transmission beyond the line-of-sight, etc. *Elect. Comm. Lab. Journ. NTT*, Japon, Vol. 8, 1183.

JOSEPHSON, B. et BLOMQUIST, A. [1958] The influence of moisture in the ground, temperature and terrain on ground-wave propagation in the VHF band. *IRE Trans.*, AP-6, 169.

KIRBY, R. S., DOUGHERTY, H. T. et McQUATE, P. L. [1955] Obstacle gain measurements over Pikes Peak at 60 to 1046 Mc. *Proc. IRE*, 43, **10**, 1467-1472.

NBS [1967] National Bureau of Standards, Note technique N° 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va (Etats-Unis d'Amérique).

NORTON, K. A. et autres [octobre 1955] Use of angular distance in estimating transmission loss and fading range for propagation through a turbulent atmosphere over irregular terrain. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1488.

OKUMURA, Y. et HARA, M. [1965] Long-term properties of UHF path loss and multipath distortion on over-the-horizon radio links using obstacle gain path. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 13, **4**.

SACHS, D. L. et autres [février 1968] A conducting slab model for electromagnetic propagation within a jungle medium. *Radio Science*, nouvelle série, Vol. 3, 125-134.

SAXTON, J. A. et LANE, J. A. [1955] VHF and UHF reception. *Wireless-World*, **61**, 229.

STARK, J. W. [1964] BBC Research Report K-170.

SWARUP, S. et TEWARI, R. K. [1975] Propagation characteristics of VHF/UHF signals in tropical moist decidious forest. *Journ. Inst. of Elect. and Telecomm. Eng.*, Vol. 21, **3**, 123-125.

TAMIR, T. [novembre 1967] On radio wave propagation in forest environments. *IEEE Trans. A & P*, Vol. AP-15, 806-817.

TAMIR, T. [juillet 1977] Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. *IEEE Trans. A & P*, Vol. AP-25, 471-477.

THIESSEN, P. [1964] Über den Einfluss der Geländebeschaffenheit auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Bereich IV (Influence des irrégularités de terrain sur la propagation des ondes électromagnétiques dans la bande IV). *Rundfunktechnische Mitteilungen*, **8**, 22-38.

TROITSKY, V. N. [1975] Diffraction des hyperfréquences causée par les crêtes montagneuses avec des irrégularités aléatoires. Publication d'articles «Propagation des ondes radioélectriques» (Rasprostranenie radiowoln), Nauka, **2** (en russe).

TROITSKY, V. N. [1976] Vliyanie snezhnovo na difraktsionnoe pole UKW v teni gornykh khrebtov. (Effet de la couverture neigeuse sur le champ rayonné par les ondes ultra-courtes dans l'ombre des crêtes montagneuses). *Radiotekjnika i Elektronika*, Vol. 21, **6**, 1222. Edition en langue anglaise: *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 21 (1977) **6**, 58.

TROITSKY, V. N. [1977] Diffusion par diffraction des hyperfréquences causée par les crêtes montagneuses. Actes de la Commission F du Colloque de l'URSI, La Baule (France).

UER [1965] Monographie C.

WAIT et autres [1974] Ed., Workshop on radio systems in forested and/or vegetated environments. USACC Technical Report, No. ACC-ACO-1-74 (AD 780712), NTIS, Springfield, Va.

WISE, F. H. [1965] The influence of propagation factors on UHF television. *Television Soc. Journ.*, Vol. 10, **11**.

---

RAPPORT 336-1 *

## RÉCEPTION SUR LA LUNE

(Programme d'études 7B/2)

(1966 - 1974)

### 1. Introduction

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

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

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

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

### 2. Diffraction dans la propagation lunaire

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

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

En deçà de l'horizon, on peut appliquer, avec les limites qu'elles comportent, les méthodes de l'optique géométrique pour la réflexion sur une surface convexe, tandis que, aux courtes distances pour lesquelles il se peut que l'irrégularité de la surface constitue un facteur dominant, il faut appliquer les méthodes décrites dans le Rapport 236-4 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

---

* Le présent Rapport, doit être porté à l'attention de la Commission d'études 2.

l'affaiblissement de diffraction sur la distance angulaire de la portion de sphère qui fait obstacle à la visibilité directe. Ceci s'applique notamment au cas de la réception, sur la face cachée de la Lune, de radiocommunications en provenance d'émetteurs situés au voisinage de la Terre.

Il apparaît donc que tous les renseignements essentiels nécessaires pour résoudre ce problème existent déjà sous une forme facilement adaptable aux paramètres considérés comme applicables à la surface incurvée de la Lune. En fait, des études ont déjà été faites selon ces principes, pour certaines constantes électriques supposées de la Lune [Vogler, 1965] (voir également le Rapport 715).

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

### 3.1 *Considérations générales*

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

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

### 3.2 *Critères servant à déterminer la surface de la calotte abritée*

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

### 3.3 *Surface de la calotte abritée*

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

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

### 3.4 *Efficacité du phénomène d'écran*

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

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

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEN, C. W. [1962] *Astrophysical quantities.* Université de Londres.

ENGLAND, A. W., SIMMONS, G. et STRANGWAY, D. [1968] Electrical conductivity of the moon. *J. Geophys. Res.,* Vol. 73, **10**, 3219.

GOLD, T., CAMPBELL, M. J. et O'LEARY, B. T. [1970] *Science,* Vol. 167, 707-709.

KOZIEL, K. [1962] The libration of the Moon. *Physics and astronomy of the Moon* (Z. Kopal, ed.) 27-58, Academic Press, Londres.

MILLINGTON, G. [1960] A note on diffraction round a sphere or cylinder. *Marconi Review,* Vol. 23, **139**, 170.

VOGLER, L. E. [1965] A study of lunar-surface radiocommunications. *NBS* Monograph No. 85. COM-72-10379, NTIS, Springfield, VA, Etats-Unis d'Amérique.

RAPPORT 716

# VARIATIONS DE PHASE DANS LA PROPAGATION DES ONDES DE SOL

(1978)

## 1. Introduction

Depuis longtemps, on s'intéresse vivement à la phase de l'onde de sol dans la propagation des ondes kilométriques en raison de l'existence de divers systèmes de radionavigation de précision à impulsions tels que le Loran-C et le Loran-D. Comme ces deux systèmes couvrent les masses continentales du globe, la phase de l'onde de sol classique, qu'on suppose se propager au-dessus d'un terrain régulier et homogène [Johler et autres, 1956; Johler, 1971], aussi bien que, plus récemment, la solution par intégrale, où interviennent les irrégularités et les inhomogénéités du trajet de propagation [Johler et Horowitz, 1974; Doherty, 1974], présentent une grande importance.

## 2. Etude des variations de phase au moyen de méthodes à impulsions

### 2.1 *Théorie de la dispersion d'impulsions au-dessus d'un terrain irrégulier et non homogène*

On a présenté récemment [Johler et Horowitz, 1974] une solution numérique d'une équation intégrale représentant l'onde de sol au-dessus d'un terrain irrégulier et non homogène et on a appliqué cette solution au calcul de l'amplitude et de la phase de l'onde non modulée, en fonction de la fréquence. Par une simulation sur ordinateur, toujours à l'aide de méthodes numériques, on a étendu ce résultat à la dimension temporelle pour obtenir la réponse aux impulsions. Ensuite, on a effectué la convolution de cette réponse avec la fonction d'impulsion du Loran-C. Le résultat final a mis en évidence la propagation à la fois de l'enveloppe des impulsions et des cycles sous cette enveloppe quand le terrain franchi est irrégulier et non homogène. Bien que des études particulières aient porté sur la propagation des impulsions du Loran-C, la méthode s'applique à la propagation de presque n'importe quelle forme d'onde impulsive au-dessus d'un terrain irrégulier et non homogène. Dans le cas de l'impulsion du Loran-C, on a conclu que la différence des temps de propagation entre l'enveloppe de l'impulsion et les cycles est fonction du type du terrain au-dessus duquel les ondes se propagent et que, dans l'état actuel des choses, il faut faire intervenir ce terrain dans la théorie de la propagation si l'on veut que la prévision du temps de propagation des impulsions soit univoque.

### 2.2 *Confirmation expérimentale de la théorie*

On s'est servi du système Loran-C pour confirmer expérimentalement des théories récentes sur la propagation de l'onde de sol [Doherty, 1974]. La phase et le temps de propagation de l'onde de sol ont été mesurés sur l'enregistrement, dans des régions très accidentées du Nevada et de la Californie, d'émissions de la chaîne Loran-D de l'armée de l'air des Etats-Unis.

Ces mesures ont montré que les irrégularités du terrain peuvent produire des perturbations de phase équivalant à des temps de propagation de plusieurs microsecondes, sur des distances de quelques longueurs d'onde. Elles se manifestent sous la forme de variations de phase, superposées à celles qu'on observe au-dessus d'un terrain régulier. Dans le cas particulier de Death Valley (Californie), une simulation théorique sur ordinateur avait permis de prévoir l'effet observé dans les limites de précision de l'appareil de mesure.

D'autres mesures faites à long terme au moyen du Loran-C [Doherty, 1974; Doherty et Johler, 1975] ont montré que la phase de la composante de sol de ces ondes kilométriques est influencée par des facteurs météorologiques, notamment par le gradient vertical de l'indice de réfraction. On a indiqué des relations empiriques entre le passage de fronts chauds et froids et des perturbations de la phase des signaux du Loran-C, mais on n'a pas encore mis au point une théorie générale à partir de mesures de gradients verticaux non linéaires.

Les mesures de ces impulsions du Loran-C et du Loran-D ont fourni une méthode originale pour mettre à l'épreuve et confirmer les théories relatives à la phase de la composante de sol des ondes kilométriques. Le besoin de précision en matière de radionavigation a stimulé la mise au point d'appareils d'émission et de réception sensibles à la nanoseconde sur un temps de propagation de plusieurs millisecondes (entre station directrice et station asservie) [Goddart, 1973].

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DOHERTY, R. H. [1974] Spatial and temporal electrical properties derived from LF pulse ground wave-propagation measurements, Agard Conference Proceedings No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular services and inhomogeneous media, 30-1 à 30-17 (publié par Dr. A. N. Ince, SHAPE Technical Centre, P.O. Box 174, La Haye, Pays-Bas).

DOHERTY, R. H. et JOHLER, J. R. [1975] Meteorological influences on Loran-C ground-wave propagation, *JATP,* **37**, 1117-1124.

GODDART, R. B. [1973] Differential Loran-C time stability study. US Coast Guard Report No. CG-D-80-74.

JOHLER, J. R. [novembre 1971] Loran radio navigation over irregular, inhomogeneous ground with effective ground impedance maps. Telecommunications Research and Engineering Report 22, Office of Telecommunications (Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, D.C. 20402).

JOHLER, J. R., KELLAR, W. J. et WALTERS, L. C. [juin 1956] Phase of the low radio-frequency ground wave. NBS Circular 573 (Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington. D.C. 20402).

JOHLER, J. R. et HOROWITZ, S. [mars 1974] Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground. Agard Conference Proceedings No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media, 28-1 à 28-13 (publié par Dr. A. N. Ince, SHAPE Technical Centre, P.O. Box 174, La Haye, Pays-Bas)

---

## RAPPORT 717 *

## ATLAS MONDIAL DE LA CONDUCTIVITÉ DU SOL

(Décision 3-2)

(1978)

Les cartes annexées (Fig. 1 à 6) constituent la première étape de la préparation de l'Atlas mondial de la conductivité du sol, dont il est question au § 4 de la Décision 3-2.

Ces cartes sont soumises aux conditions suivantes:

- leur application est limitée, tout au moins dans l'immédiat, aux ondes myriamétriques, c'est-à-dire à une fréquence au plus égale à 30 kHz (voir ci-dessous);
- il n'y est pas tenu compte des variations saisonnières, car la grande profondeur de pénétration des ondes jusqu'à 30 kHz rend peu vraisemblable que ces variations soient sensibles;
- les cartes ont été établies à partir des données géomorphologiques et géologiques servant à définir les limites des zones continentales ayant une conductivité donnée et des données réelles de conductivité qui ont été calculées à partir de mesures fournies par de nombreux chercheurs [Morgan, 1968]. Le cartouche de chaque carte contient la précision estimée et la variabilité prévue des valeurs locales autour des moyennes régionales indiquées;
- elles représentent les conductivités apparentes du sol (l'effet du terrain est compris dans les valeurs);
- comme il est vraisemblable que les variations saisonnières sont d'autant plus sensibles que la fréquence est plus élevée (puisque la profondeur de pénétration décroît), il faudra éventuellement présenter les cartes relatives aux fréquences supérieures à 30 kHz de manière à y faire figurer la variation en cours d'année. Toutefois, il ressort des données relevées par l'Administration de l'Inde qu'à des fréquences pouvant atteindre 1 MHz les variations saisonnières n'ont qu'une influence négligeable sur la propagation dans les zones tropicales.

Dans les régions du monde où l'on peut comparer les données mesurées, la conductivité apparente peut être sensiblement différente selon qu'il s'agit des ondes myriamétriques ou des ondes hectométriques (de 300 à 3000 kHz). En conséquence, pour les fréquences très supérieures à 30 kHz, il conviendrait de faire preuve de prudence avant d'envisager l'adoption des cartes annexées.

### RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

MORGAN, R. R. [1968] *World-wide VLF effective conductivity map.* Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington D.C., Etats-Unis d'Amérique, AD675771, NTIS, Springfield, Va, Etats-Unis d'Amérique.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 6, 8 et 10.

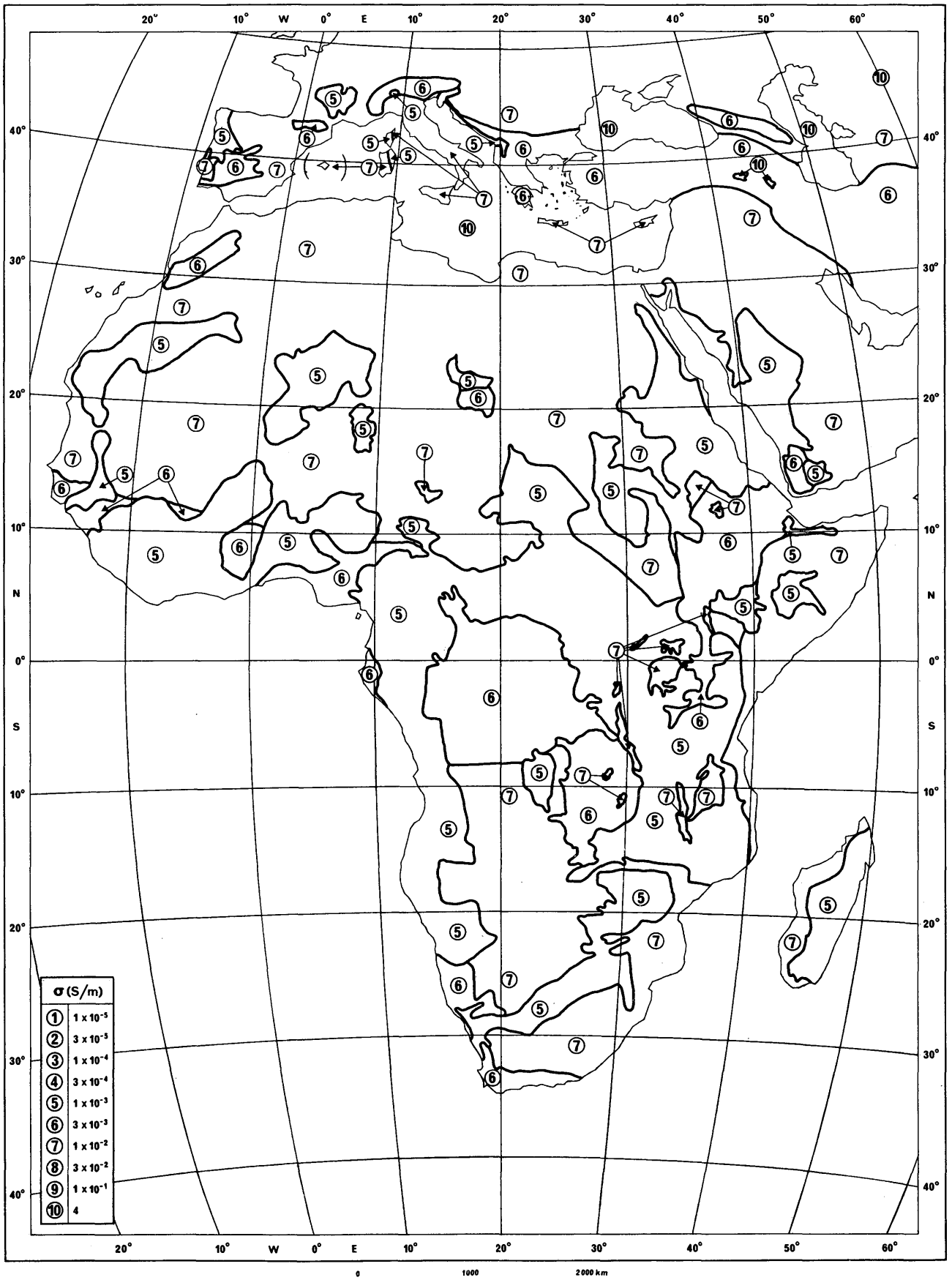



FIGURE 1 – *Afrique*

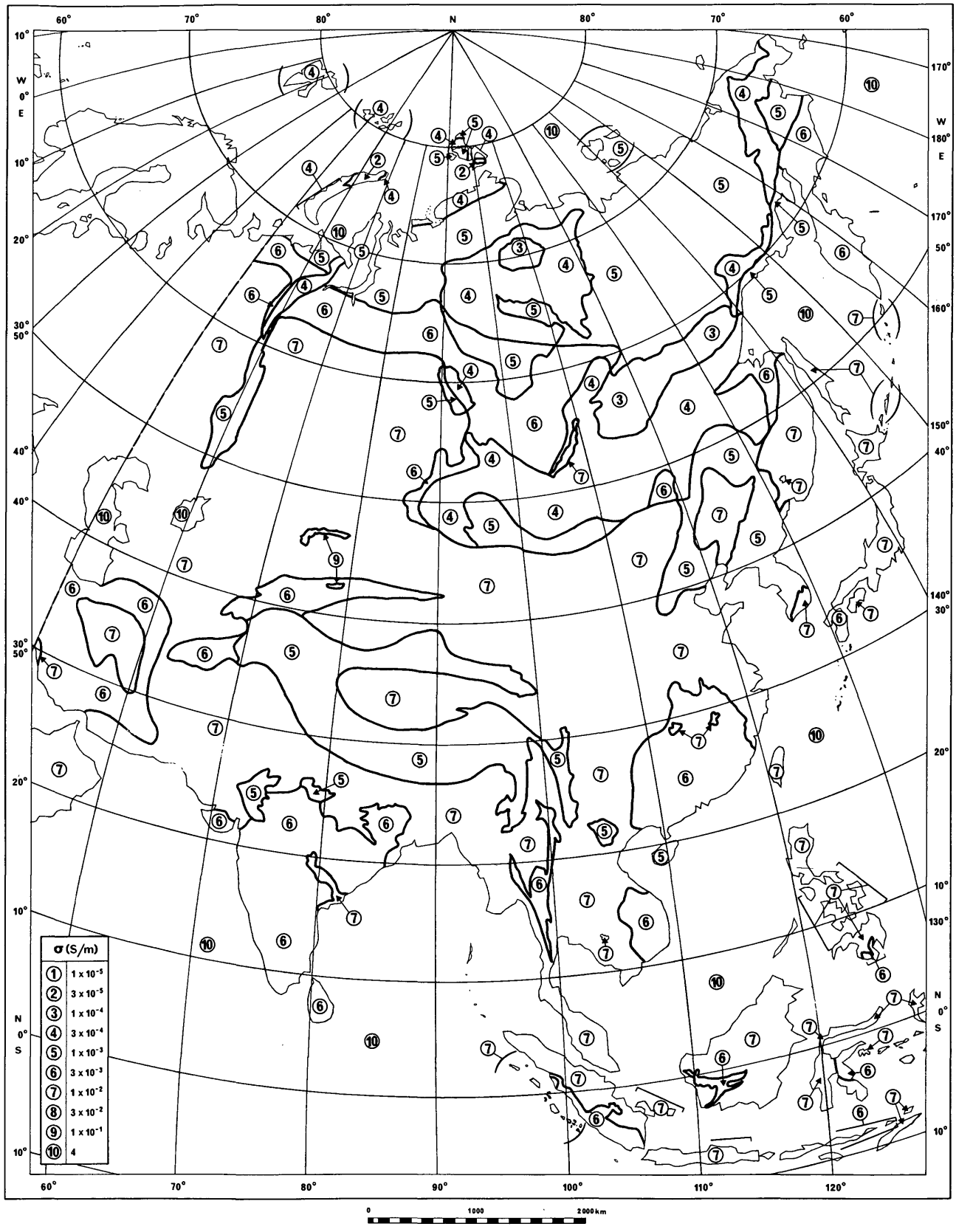



FIGURE 2 – *Asie*

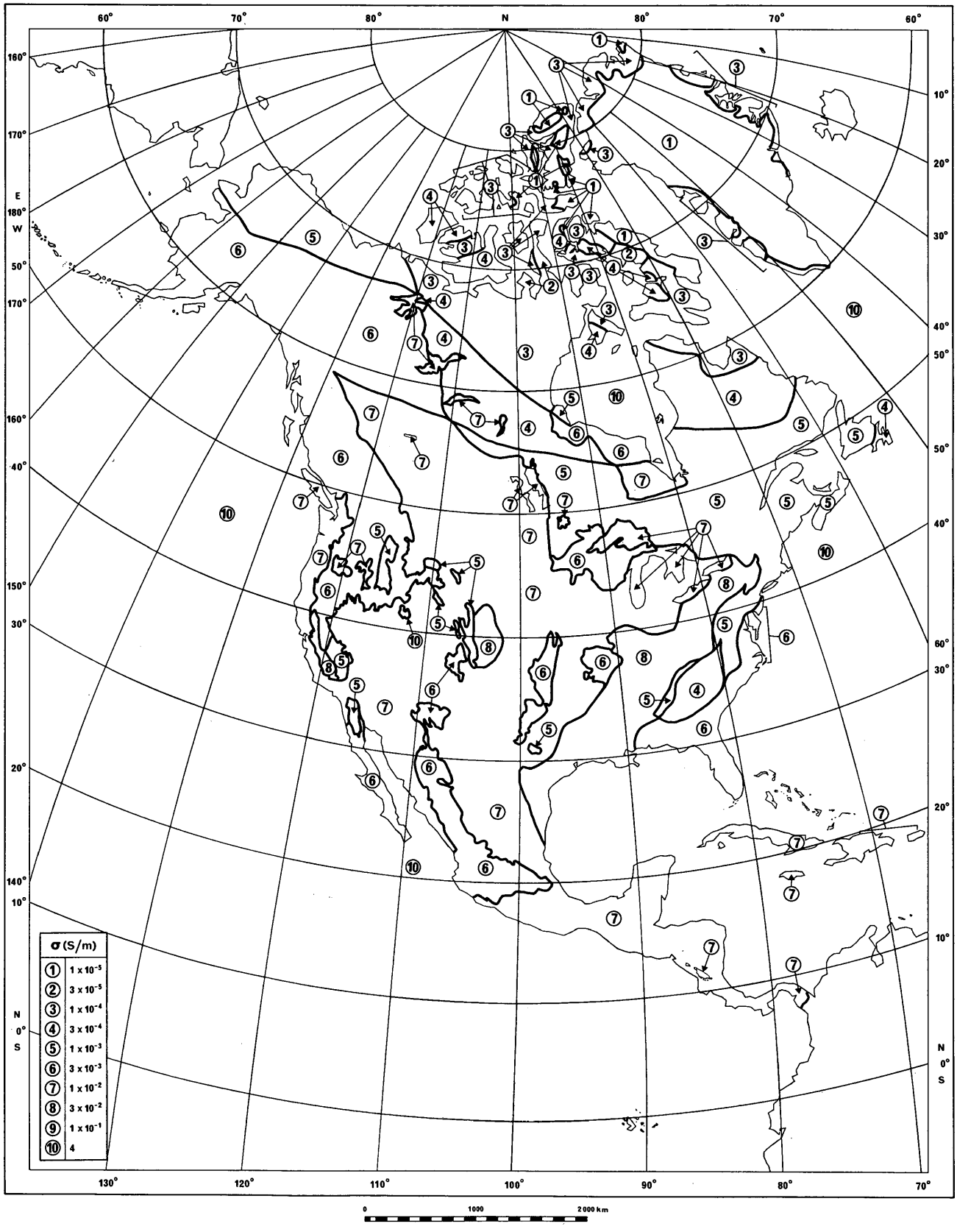



FIGURE 3 – *Amérique du Nord*

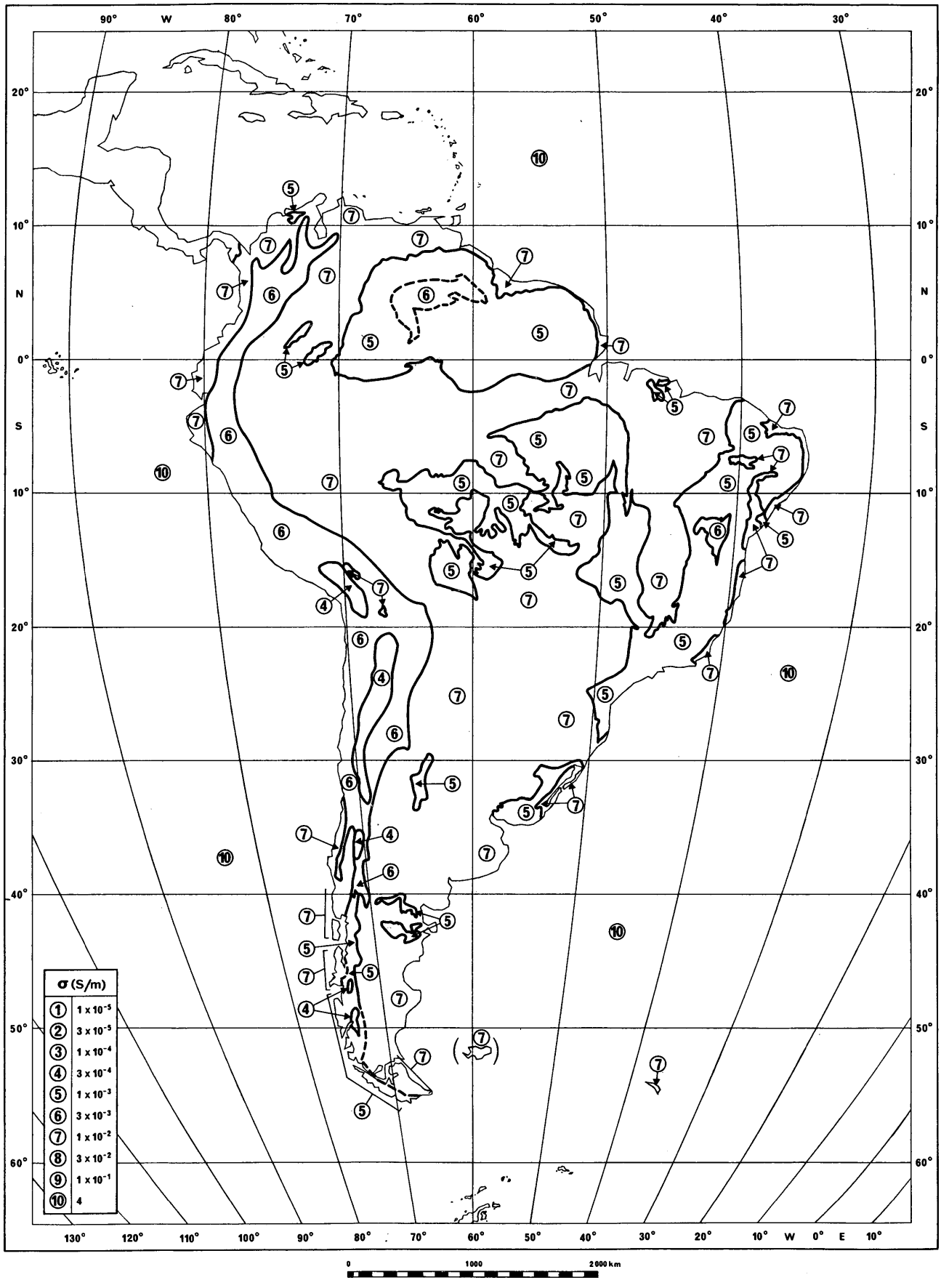



FIGURE 4 – *Amérique du Sud*

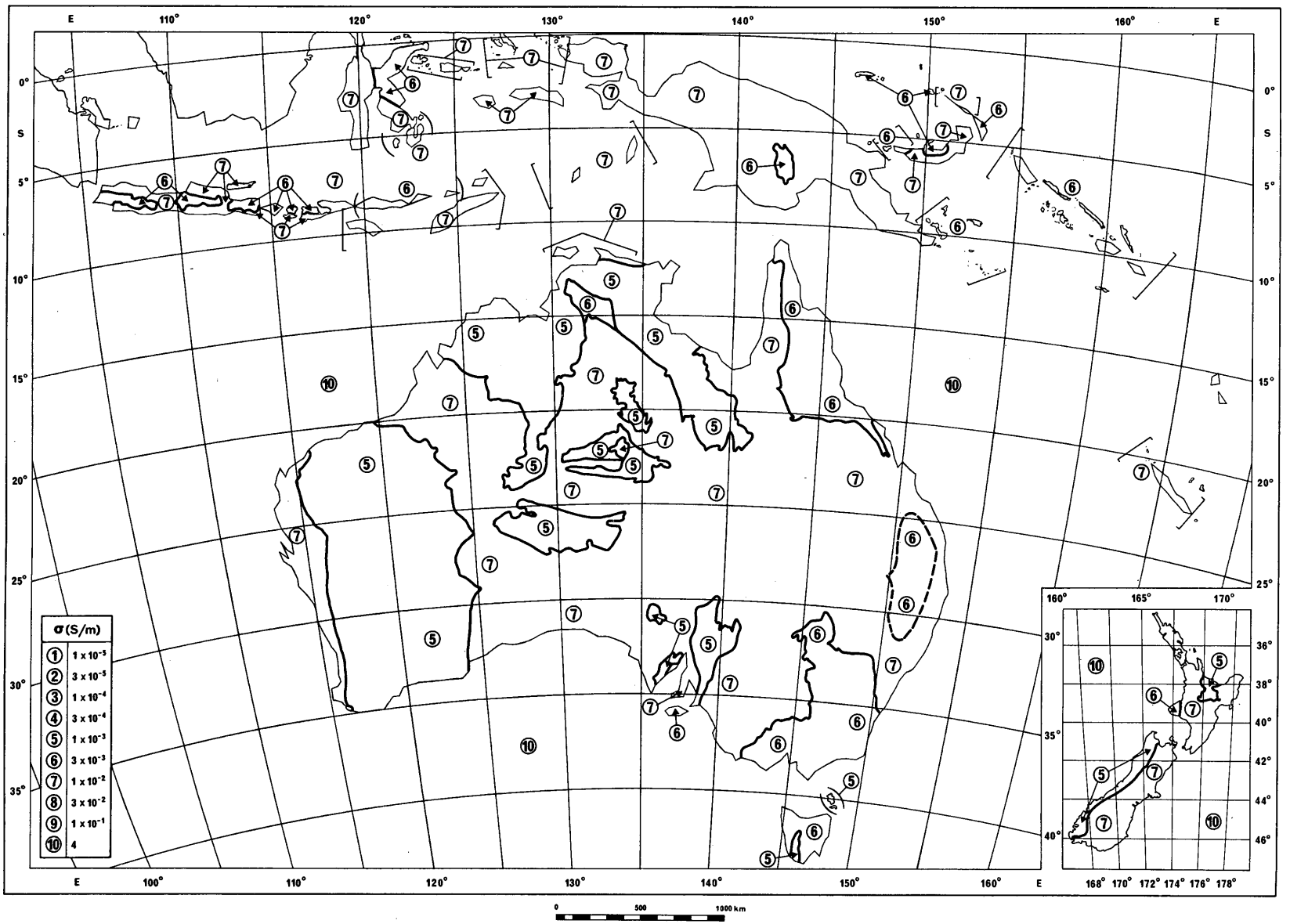



FIGURE 5 – *Australie*

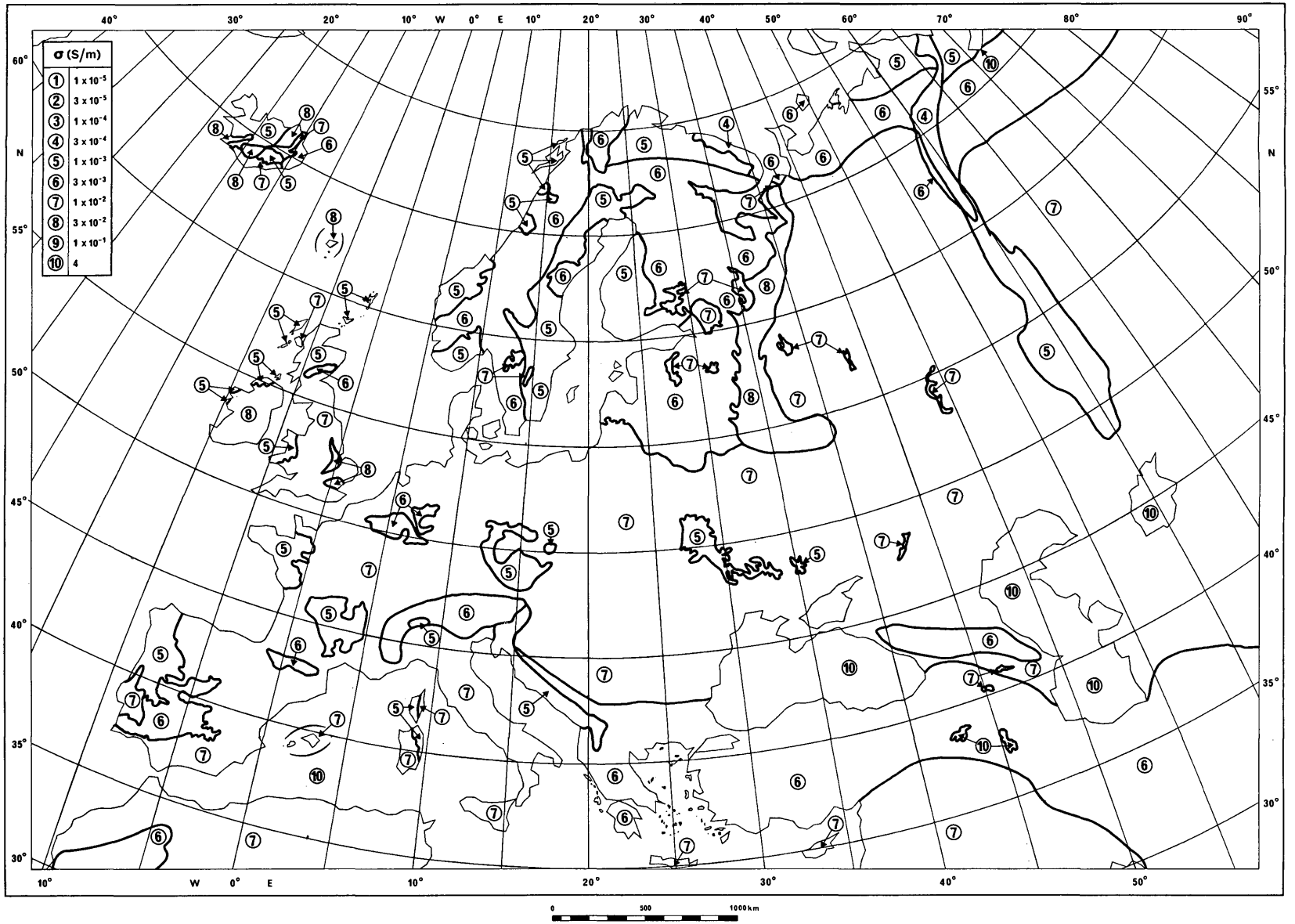



FIGURE 6 – *Europe*

SECTION 5C: EFFETS DE L'ATMOSPHÈRE

*Avis et Rapports*

AVIS 310-4

## DÉFINITIONS DE TERMES SE RAPPORTANT A LA PROPAGATION DANS LA TROPOSPHÈRE

(1951 - 1959 - 1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

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

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

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

VOCABULAIRE DES TERMES RELATIFS A LA PROPAGATION 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. Cette partie de l'atmosphère s'étend jusqu'à une altitude de l'ordre de 9 km aux pôles et de 17 km à l'équateur. |
| 2. *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'OMM, est signalée dans le Doc. [CCIR, 1966-69]). |
| 3. *Inversion de température* | Augmentation de température avec la hauteur. |
| 4. *Rapport de mélange* | Rapport de la masse de la vapeur d'eau à la masse de l'air sec dans un volume donné d'air (exprimé fréquemment en g/kg). |
| 5. *Humidité relative par rapport à l'eau (ou à la glace)* | Rapport exprimé en pourcentage, de la tension de vapeur d'eau présente dans l'air humide à la tension de vapeur saturante par rapport à l'eau (ou à la glace) à la même température et la même pression. |
| 6. *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 dans 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 par rapport à l'unité, exprimé en millionièmes, de l'indice de réfraction modifié. |
| 11. *Unité M* | Unité dans laquelle est exprimé le module de réfraction. |
| 12. *Gradient normal du coïndice* | Valeur conventionnelle du gradient vertical du coïndice. Cette valeur utilisée comme base de comparaison pour les études de phase et de réfraction est de $-40$ $N$/km. Elle correspond approximativement à la valeur médiane du gradient sur le premier kilomètre d'altitude dans les régions tempérées. |
| 13. *Atmosphère radioélectrique normale* | Atmosphère ayant un gradient normal du coïndice de réfraction. |
| 14. *Atmosphère de référence pour la réfraction* | Atmosphère dont le coïndice ($N$) est une fonction exponentielle décroissante de la hauteur (Avis 369-2). |
| 15. *Réfraction normale* | Réfraction qui se produirait dans l'atmosphère radioélectrique normale. |
| 16. *Infraréfraction* | Réfraction pour laquelle le gradient du coïndice de réfraction est supérieur à la normale. |

17. *Superréfraction* — Réfraction pour laquelle le gradient du coïndice de réfraction est inférieur à la normale.

18. *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.

19. *Horizon radioélectrique normal* — Horizon radioélectrique dans le cas d'une réfraction normale.

20. *Rayon terrestre équivalent* — Rayon d'une Terre fictive et sans atmosphère, telle que les trajets radioélectriques au-dessus de cette Terre soient rectilignes, les altitudes et les distances le long du sol étant les mêmes que sur la Terre réelle supposée entourée d'une atmosphère dont le gradient vertical du coïndice est constant. (Pour l'atmosphère radioélectrique normale, le rayon terrestre équivalent est égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre.)

*Note.* – La notion du rayon terrestre équivalent implique que le trajet radioélectrique ne fait en aucun point un angle trop grand avec le plan horizontal correspondant.

21. *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.

22. *Conduit au sol (Conduit de surface)* — Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au sol.

23. *Conduit élevé* — Conduit troposphérique dont la limite inférieure est au-dessus du sol.

24. *Epaisseur du conduit* — Différence d'altitude entre les surfaces limites, inférieure et supérieure, d'un conduit troposphérique radioélectrique.

25. *Hauteur du conduit* — Hauteur au-dessus du sol de la surface inférieure d'un conduit élevé.

26. *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'ondes).

27. *Propagation transhorizon* — Propagation sur des trajets dépassant l'horizon radioélectrique normal. Il peut englober divers mécanismes tels que la diffraction, la diffusion avant, la réflexion spéculaire et diffuse et la propagation guidée.

28. *Propagation par diffusion troposphérique* — Propagation mettant en jeu la diffusion par de nombreuses inhomogénéités ou discontinuités de l'indice de réfraction de l'atmosphère.

29. *Propagation par diffusion par les précipitations* — Propagation due à la diffusion par les particules des précipitations.

30. *Propagation par trajets multiples* — Propagation par un certain nombre de trajets de transmission.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Document du CCIR*
[1966-69]: V/9 (URSI).

---

## AVIS 369-2

## ATMOSPHÈRE DE RÉFÉRENCE POUR LA RÉFRACTION

(1959 - 1963 - 1966 - 1978)

Le CCIR,

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

$$n(h) = 1 + a \times e^{-bh} \quad (1)$$

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

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

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

$$n(h) = 1 + 315 \times 10^{-6} \times e^{-0{,}136h} \quad (2)$$

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

*Note.* – Le gradient moyen de l'indice de réfraction de cette atmosphère dans le premier kilomètre à partir de 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 2-3/5)

(1970)

Le CCIR,

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

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

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

dans laquelle:

$N$ est le coïndice exprimé par:

$$N = \frac{77{,}6}{T}\left(p + 4810\frac{e}{T}\right) \text{ avec} \quad (2)$$

$p$: pression atmosphérique (mb),

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

$T$: température absolue (K).

---

RAPPORT 563-1

## DONNÉES RADIOMÉTÉOROLOGIQUES

(Question 2-3/5)

(1974 - 1978)

### 1. Introduction

Certains calculs de propagation nécessitent la connaissance de données radiométéorologiques. On trouvera dans ce Rapport des données et des modèles fondamentaux concernant la variation temporelle et spatiale des paramètres nécessaires: coïndice de réfraction, teneur en vapeur d'eau, données statistiques des précipitations, caractéristiques des tempêtes de sable et de poussière. Ces données ont pour objet de fournir des indications générales sur le comportement de chaque paramètre à l'échelon mondial; elles ne doivent être utilisées dans le calcul que dans les cas où on ne dispose pas de données détaillées pour telle ou telle région considérée. *

### 2. Coïndice de réfraction

2.1 *Définition*

L'indice de réfraction de l'air est très proche de l'unité. Le coïndice de réfraction, $N$, est défini de la manière suivante:

$$N = (n - 1) \times 10^6 \qquad \text{(unités } N\text{)} \quad (1)$$

---

* Ces régions ne doivent pas être confondues avec la classification climatique pour la diffusion troposphérique indiquée dans le Rapport 238-3.

où $n$ est l'indice de réfraction. $N$ est le paramètre qu'on utilise généralement pour décrire la variation spatiale et temporelle de l'indice de réfraction. Aux fréquences radioélectriques, on peut adopter, comme approximation du coïndice [Bean et Dutton, 1966]:

$$N = 77{,}6 \frac{P}{T} + 3{,}73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

où

$P$: pression atmosphérique (mb)
$T$: température absolue (K)
$e$: pression de la vapeur d'eau (mb).

Cette expression peut être utilisée pour toutes les fréquences; pour les fréquences allant jusqu'à 100 GHz, elle introduit une erreur inférieure à 0,5%.

En un point de l'espace, la variation du coïndice de réfraction est due essentiellement aux variations de température et de teneur en vapeur d'eau. Ces variations peuvent s'étendre sur des périodes allant de quelques secondes à plusieurs mois. Lorsqu'il s'agit de fluctuations s'étendant dans le temps sur moins de quelques minutes ou dans l'espace sur moins de quelques kilomètres, on parle généralement de fluctuations turbulentes ou d'irrégularités à petite échelle. Les variations sur de plus grandes distances ou sur des périodes plus longues sont considérées comme des variations des propriétés macroscopiques du milieu.

## 2.2 *Variation de N dans les modèles d'atmosphère*

$N$ varie principalement avec la hauteur. La Fig. 1 montre cette variation, pour un profil atmosphérique moyen aux latitudes moyennes [U.S. Standard Atmosphere Supplements, 1966; Crane, 1976]. Cette figure représente également l'atmosphère exponentielle moyenne. La variation de $N$ dans le sens vertical est la cause principale des effets de réfraction atmosphérique tels que la courbure des rayons et la défocalisation (voir le Rapport 718). C'est dans la couche atmosphérique la plus basse que la variation verticale présente le plus d'importance pour le calcul des effets de réfraction. On voit que l'atmosphère exponentielle moyenne est bien ajustée au modèle d'atmosphère dans cette région, qui est la plus importante pour l'estimation de la courbure des rayons.

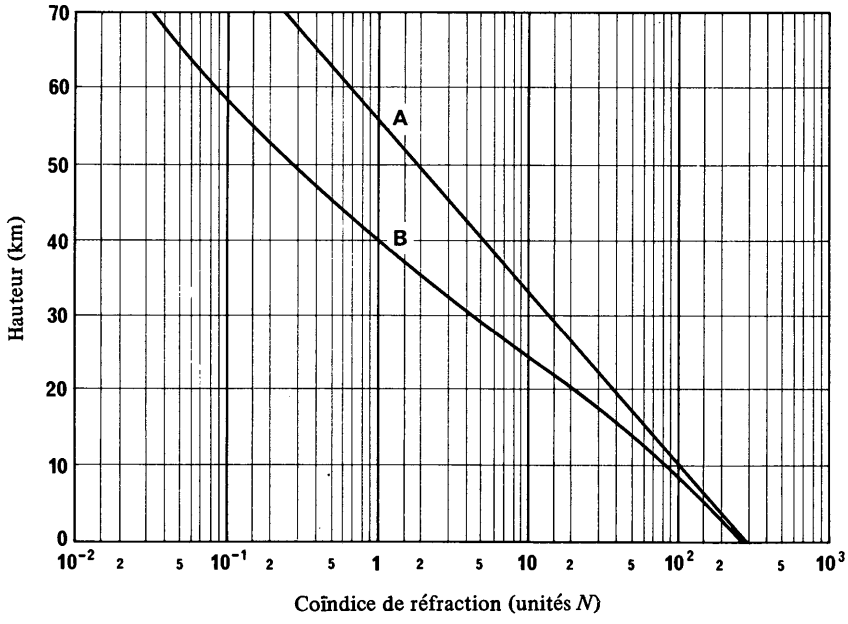



FIGURE 1 – *Profils du coïndice de réfraction pour deux modèles d'atmosphère*

A: Modèle exponentiel moyen
B: Modèle pour des latitudes moyennes (atmosphère sèche)

L'atmosphère exponentielle moyenne est définie par:

$$N(h) = N_A \cdot \exp(-b_A h) \quad (3)$$

où $N(h)$ est la valeur de $N$ à la hauteur $h$ (km), les constantes $N_A$ et $b_A$ ayant les valeurs suivantes:

$$N_A = 315 \qquad \text{unités } N$$
$$b_A = 0{,}136 \qquad \text{km}^{-1}$$

$N_A$ est la valeur moyenne du coïndice à la surface de la Terre.

On admet que le coïndice de réfraction est stratifié dans le sens horizontal (il dépend seulement de la hauteur), pour la plupart des modèles d'atmosphère.

2.3 *Cartes mondiales du coïndice de réfraction à la surface, rapporté à un niveau de référence*

$N_s$, valeur de $N$ à la surface de la Terre, est un paramètre important pour la prévision d'un grand nombre d'effets de propagation (voir le Rapport 718). Pour réduire à un minimum l'influence de la variation de la hauteur au-dessus de la surface (topographie) sur les cartes de $N_s$, il est commode de transformer les valeurs du coïndice en les rapportant au niveau de référence, à l'aide du modèle exponentiel. Pour revenir de la valeur de référence, $N_0$, aux valeurs $N_s$, on applique la relation:

$$N_s = N_0 \cdot \exp(-b_A h_s) \tag{4}$$

où $h_s$ est la hauteur au-dessus du niveau de la mer.

Les Fig. 2 et 3 représentent, respectivement pour les mois de février et d'août, des cartes mondiales des moyennes mensuelles de $N_0$. La Fig. 4 indique les régions dans lesquelles les moyennes mensuelles de $N_0$ dépassent 350 unités $N$ pendant au moins un mois de l'année et pour chaque mois de l'année. Il existe un recueil de cartes et de graphiques des moyennes mensuelles de $N_0$ pour certains mois [Bean et autres, 1960].

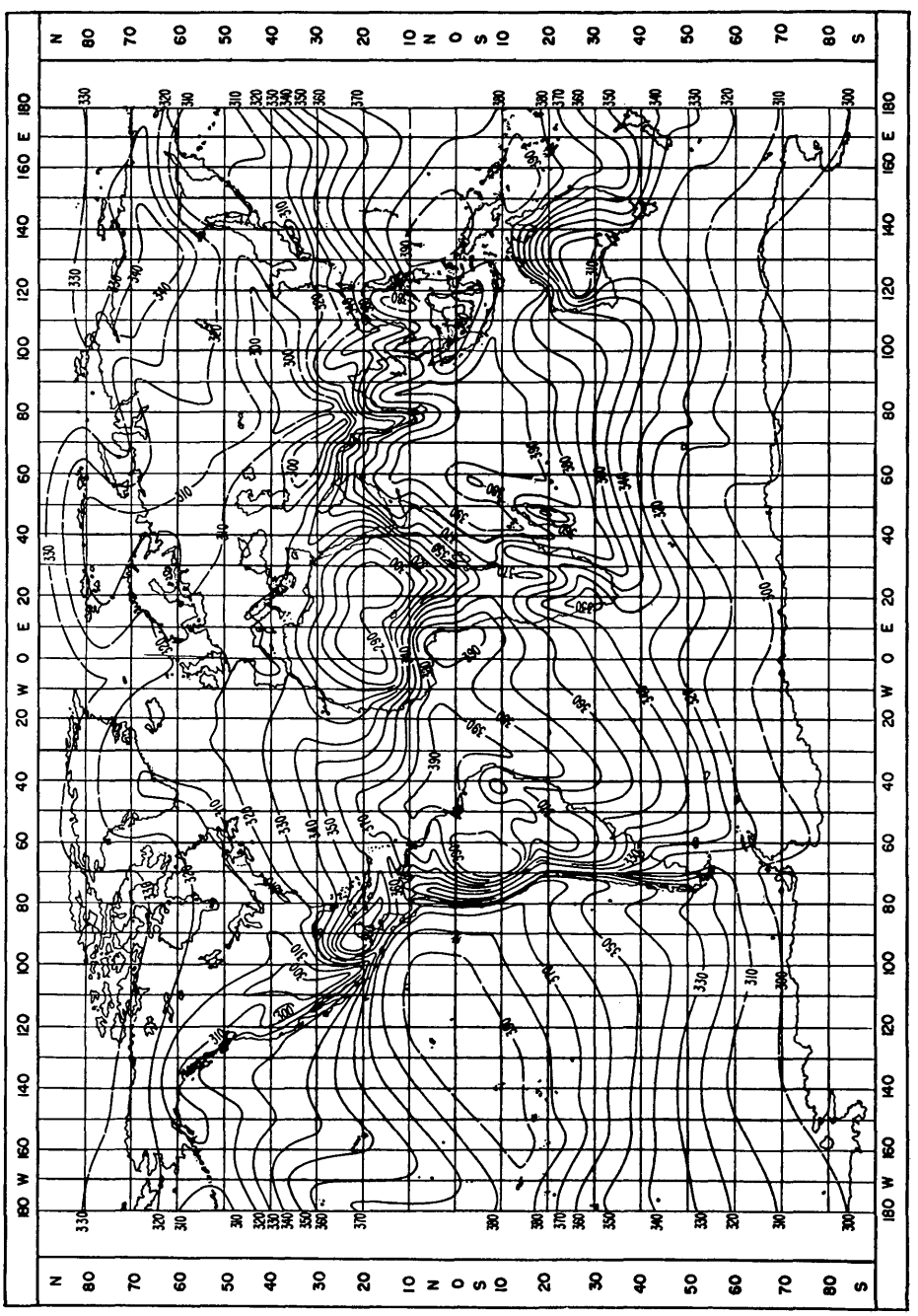


FIGURE 2 – *Moyenne mensuelle de $N_0$ : février*

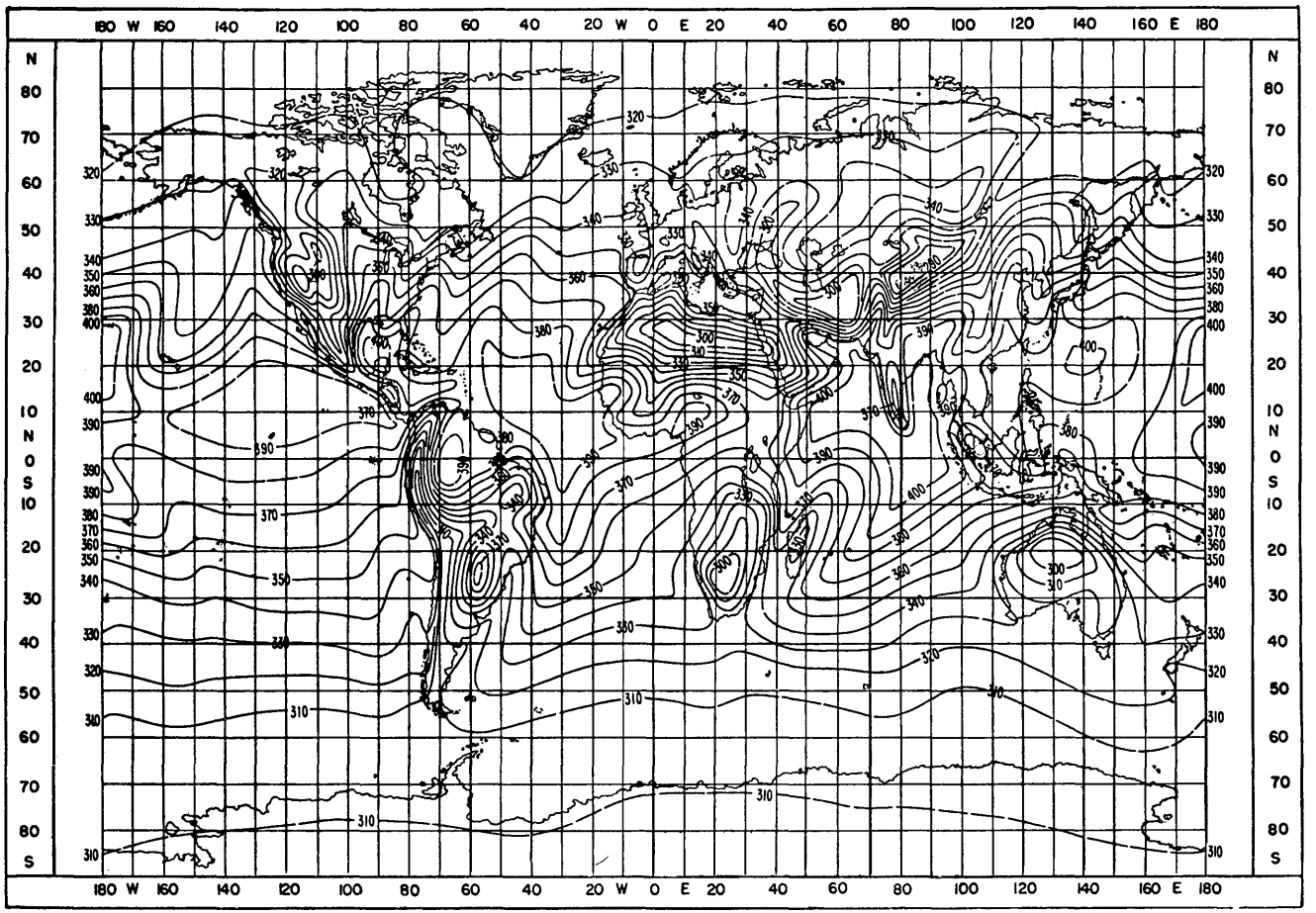



FIGURE 3 – *Moyenne mensuelle de $N_0$ : août*

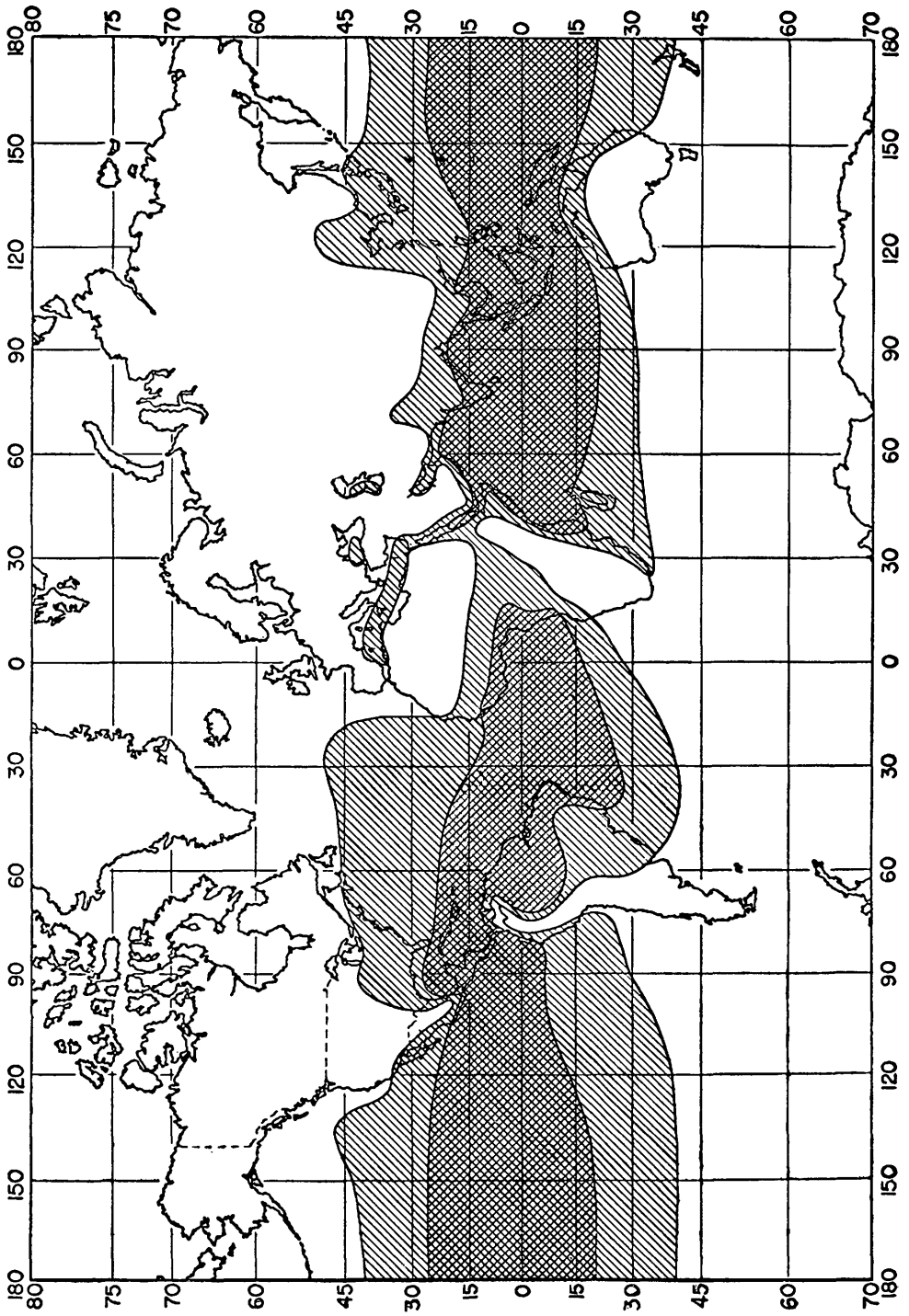



FIGURE 4

Il faut agir avec prudence lorsqu'on utilise ces cartes pour faire l'estimation d'une moyenne mensuelle, pour un mois donné et une saison donnée; en effet, la variation d'une année à une autre, pour un mois donné, peut dépasser les différences saisonnières indiquées sur les cartes.

2.4 *Gradients du coïndice*

Le gradient vertical du coïndice dans la couche la plus basse de l'atmosphère est un paramètre important pour l'estimation des effets de réfraction telle la formation de conduits (voir les Rapports 569-1 et 718). On a effectué des analyses statistiques pour décrire la variation de $N$ sur le premier kilomètre et sur les 100 premiers mètres de l'atmosphère.

2.4.1 *Cartes mondiales de $\Delta N$ – diminution de N sur une couche de 1 km*

Les Fig. 5 à 8 représentent des cartes de la diminution moyenne mensuelle du coïndice, dans une couche de 1 km dont la limite inférieure se trouve à la surface de la Terre [Bean et autres, 1966]. La variation de $N$, soit $\Delta N$, a été calculée d'après la formule:

$$\Delta N = N_s - N_1 \tag{5}$$

où $N_1$ est la valeur du coïndice à une hauteur de 1 km au-dessus de la surface. Les valeurs de $\Delta N$ n'ont pas été rapportées à une surface de référence.

[Pawlowski, 1975] a obtenu pour la Pologne des données statistiques sur $\Delta N$ et sur l'influence des facteurs synoptiques.

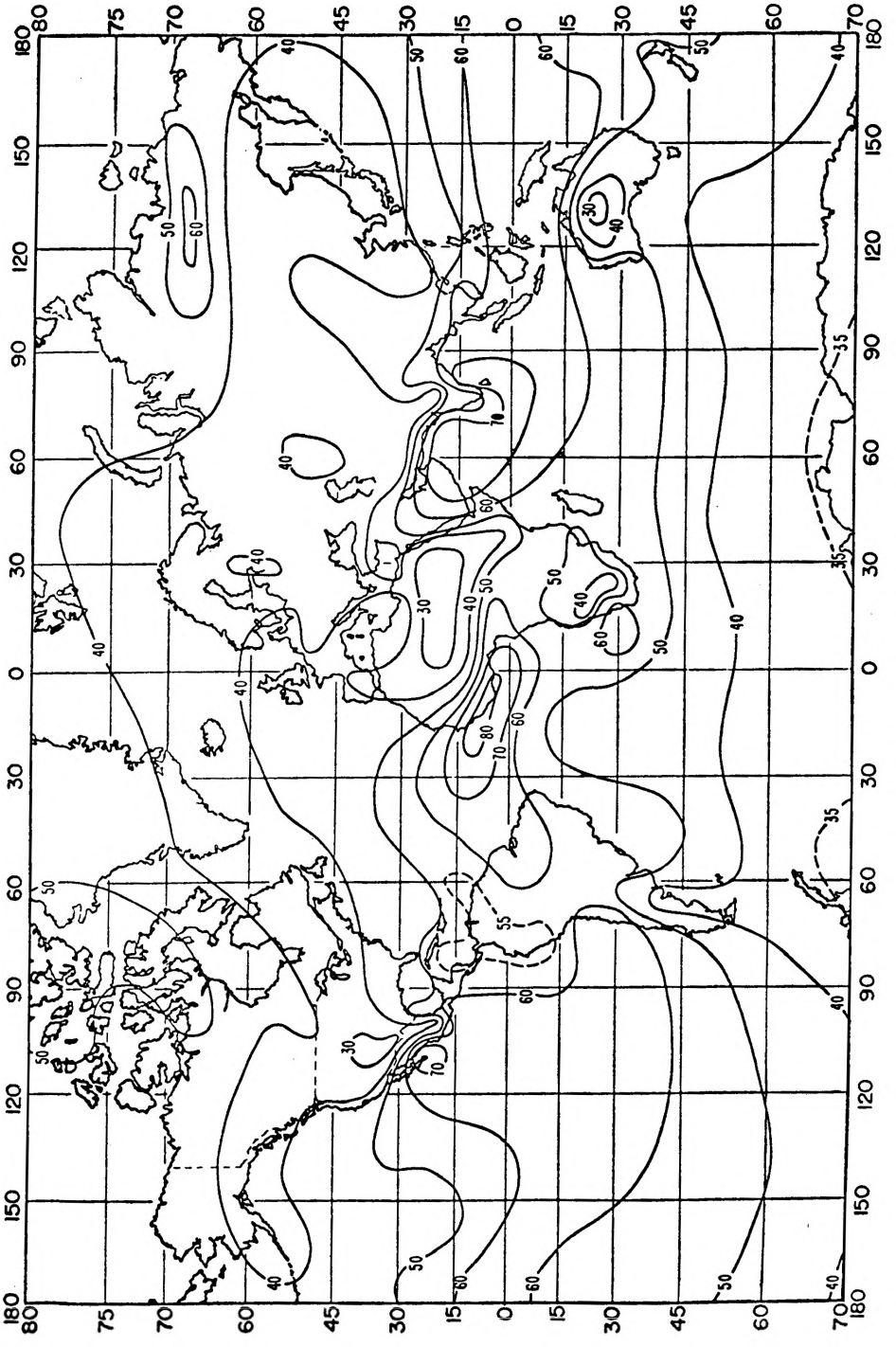


FIGURE 5 – *Moyenne mensuelle de $\Delta N$: février*

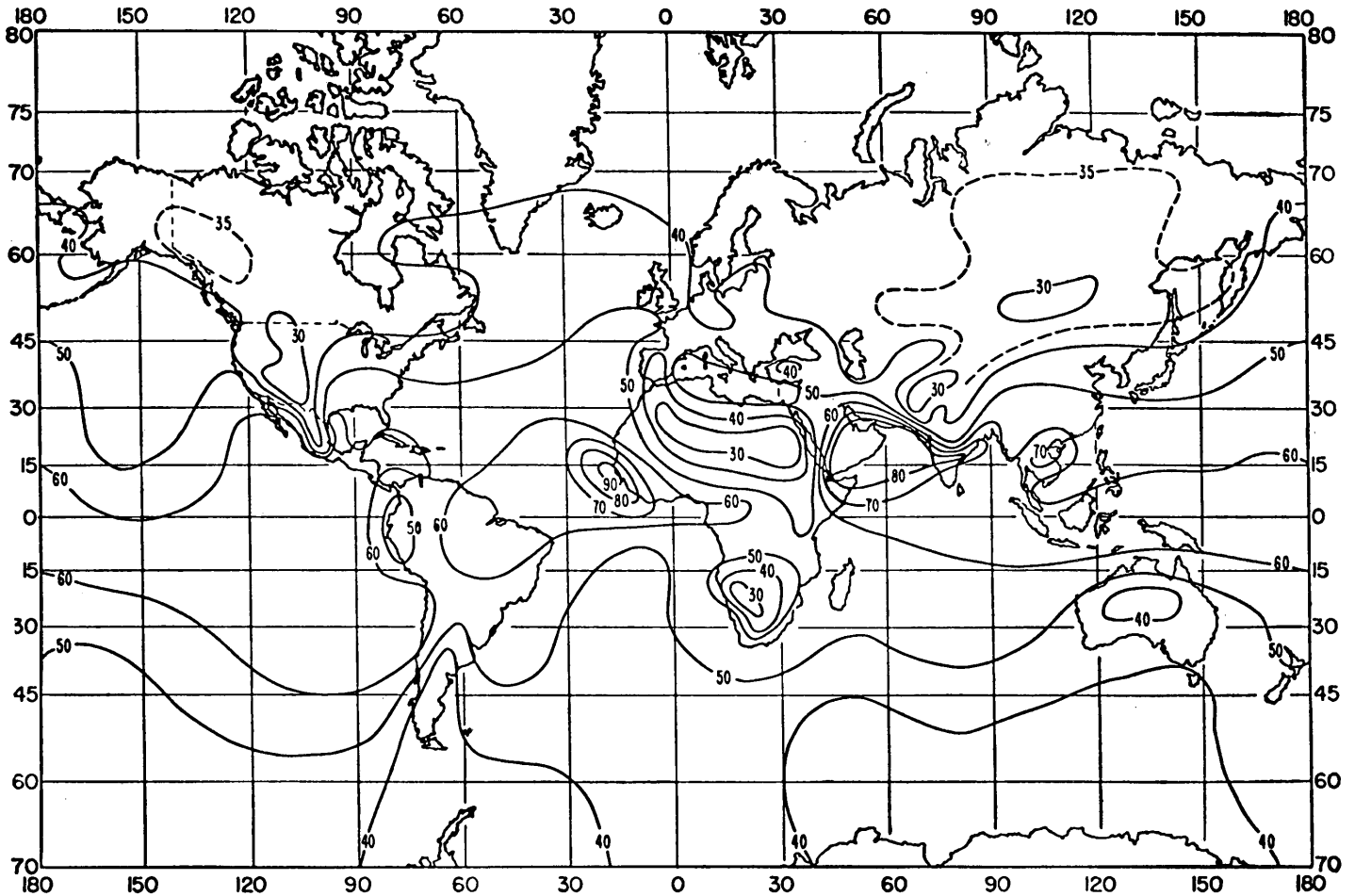



FIGURE 6 – *Moyenne mensuelle de $\Delta N$: mai*

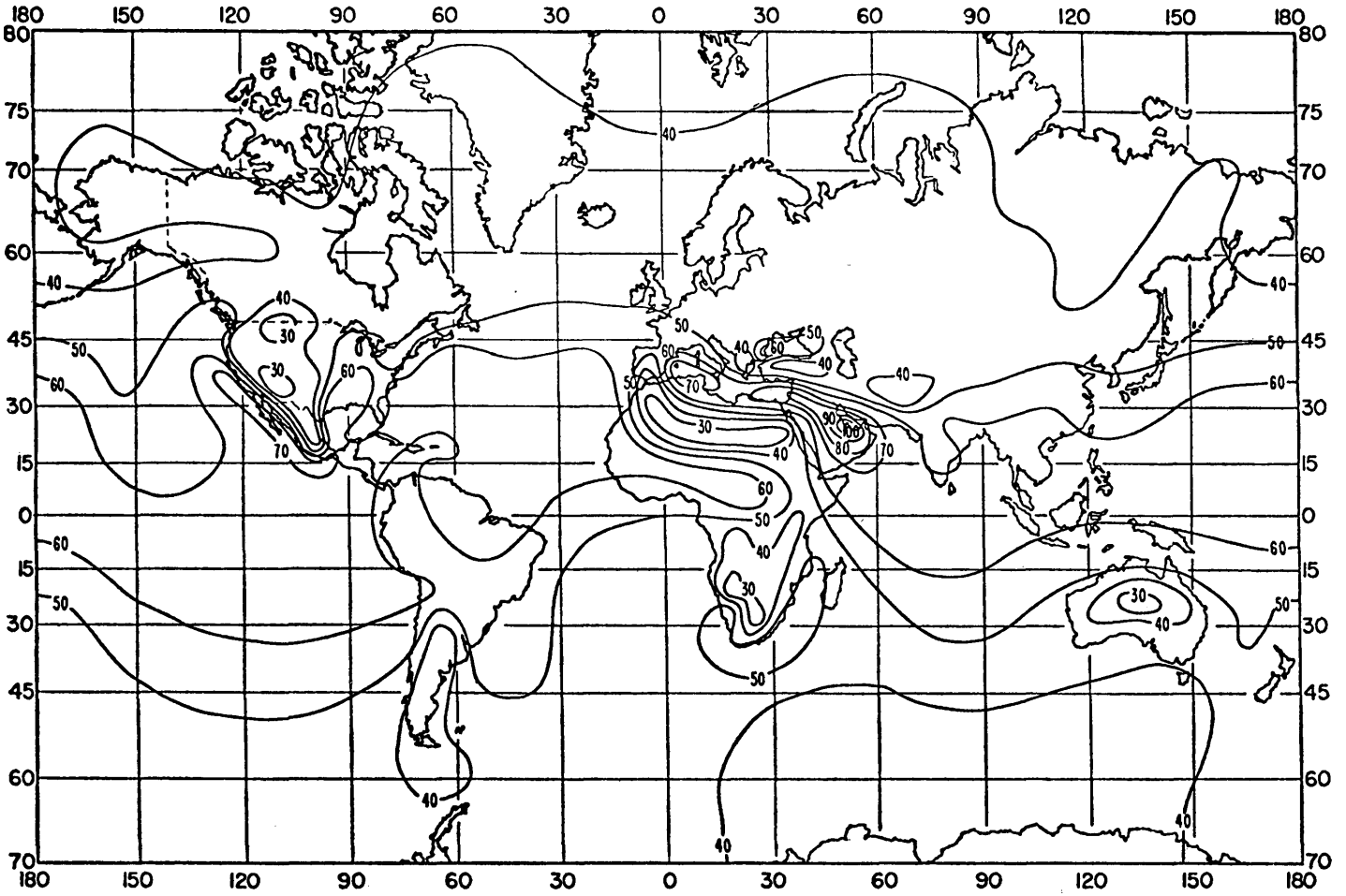



FIGURE 7 – *Moyenne mensuelle de ΔN: août*

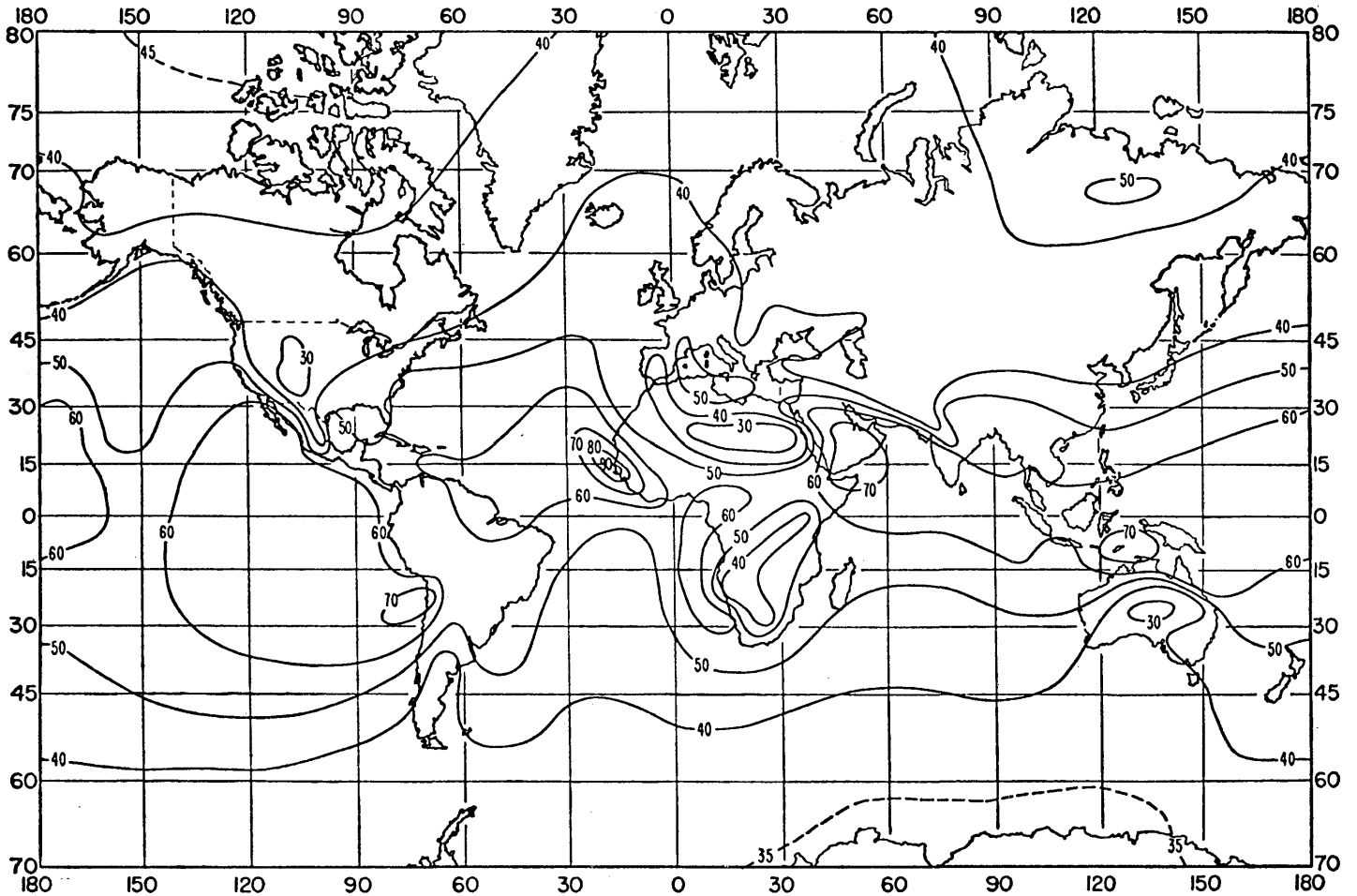



FIGURE 8 – *Moyenne mensuelle de ΔN: novembre*

2.4.2 *Moyennes des gradients verticaux sur les 100 premiers mètres*

Les mesures du gradient vertical de l'indice de réfraction dans les basses couches de l'atmosphère montrent que la gamme des valeurs est extrêmement étendue. Aux Etats-Unis, à Cap Kennedy (Floride), on a mesuré le gradient vertical dans les 100 premiers mètres au-dessus de la surface de la Terre. On a trouvé que ce gradient est compris entre 230 *N*/km, valeur dépassée pendant 0,05% du temps, et $-370$ *N*/km, valeur dépassée pendant 99,9% du temps [Dougherty, 1968].

Des études effectuées en France dans la région de Paris ont donné des résultats très voisins des précédents.

Des mesures faites au Japon et au Royaume-Uni [Hall et Comer, 1969] ont donné des résultats très semblables; ceux-ci montrent que, pour les 100 premiers mètres, les valeurs 70 *N*/km et $-200$ *N*/km environ étaient dépassées respectivement pendant 0,1% et 99,9% du temps.

Des mesures faites en U.R.S.S. [Kalinine, 1964] ont montré que la distribution statistique du gradient vertical de l'indice de réfraction dans la couche de 0 à 200 m tend vers la loi normale dans la plupart des régions climatiques de l'U.R.S.S. (sauf les régions montagneuses et côtières).

Pour l'Asie du Sud-Est, on a pu établir la fonction de distribution suivante pour $\alpha = -\Delta N/\Delta h$, en analysant avec précision des données météorologiques [Akiyama, 1971]:

$$\left.\begin{aligned} F(\alpha) &= 0{,}5 \exp\left[4(\alpha-\alpha_m)/3\sigma\right] && \text{pour} && -\infty < \alpha \leqslant \alpha_p \\ &= 0{,}5 \operatorname{erfc}\left[-(\alpha-\alpha_m)/\sqrt{2}\sigma\right] && \text{pour} && \alpha_p < \alpha < \infty \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

où

$$\alpha_p = \alpha_m - 1{,}48\sigma, \quad \alpha_m = \Delta N, \quad \sigma = \sigma_{\Delta N}/\sqrt{\Delta h}$$

$\Delta N$ et $\sigma_{\Delta N}$ sont respectivement la moyenne mensuelle et l'écart type de $\alpha$ pour la couche correspondant au premier kilomètre au-dessus de la surface de la Terre; $\Delta h$ est l'épaisseur (km) de la couche considérée. On a établi une relation entre $\sigma_{\Delta N}$ et $N_s$; $\Delta N$ et $\sigma_{\Delta N}$ sont exprimés en fonction de la latitude, pour l'Asie du Sud-Est [Akiyama et Hatano, 1977; Akiyama, 1977].

On a analysé les données fournies pendant cinq ans par des radiosondes, pour un certain nombre de stations de la zone tropicale [Dougherty et Hart, 1977]; cette analyse a révélé qu'un certain pourcentage de gradients verticaux extrêmes du coïndice (moyenne mesurée sur quelques premières centaines de mètres au-dessus du sol) se trouvent à l'extérieur de la gamme de 0 à $-157$ unités *N*/km, gamme plus étendue que celle observée dans la plupart des emplacements de la zone tempérée. Dans cette dernière zone, on note une distribution saisonnière du maximum et du minimum d'apparitions des gradients extrêmes; ce phénomène n'a pas été mis en évidence dans les stations de la zone tropicale.

On a aussi observé une corrélation entre le gradient vertical de l'indice de réfraction et la valeur de cet indice à la surface de la Terre [Bean et Meany, 1955; Misme, 1958; Lane, 1961; Misme et autres, 1960], tout au moins pour les moyennes mensuelles [Wickerts, 1968].

Toutefois, cette corrélation n'existe pas pendant tout le temps et en tous les emplacements. Plus précisément, elle n'existe pas toujours dans certaines régions lorsque $N_s$ atteint des valeurs très élevées, par exemple supérieures à 350 [Boithias et Misme, 1964].

2.5 *Irrégularités à petite échelle*

Les irrégularités turbulentes à petite échelle du coïndice peuvent causer une diffusion des ondes radioélectriques, qui se manifeste par une diffusion troposphérique vers l'avant et à une scintillation (voir le Rapport 718). La variation statistique de $n$ sur de petites distances (inférieures à 10 m) peut être représentée par la densité spectrale de la puissance volumique:

$$\Phi_n(\underset{\sim}{s}) = \Phi_n(s) = 0{,}033\ C_n^2 s^{-11/3} \quad (7)$$

où $\Phi_n$ est la densité spectrale de puissance, $\underset{\sim}{s}$ le vecteur d'onde, $s$ l'amplitude du vecteur d'onde, avec $s = 2\pi/l$, où $l$ est l'étendue verticale, et $C_n^2$ le paramètre de structure du coïndice. Cette description suppose que les fluctuations turbulentes sont isotropes et que $s$ se trouve dans la sous-gamme d'inertie [Tatarskii, 1967]. Les fluctuations de l'indice de réfraction sur de plus grandes étendues verticales peuvent être très anisotropes, et il n'est pas possible de les représenter simplement par ce modèle.

$C_n^2$ est un paramètre macroscopique qui varie dans l'espace et dans le temps. La variation la plus importante est la variation en fonction de la hauteur. Les valeurs de $C_n^2$ près de la surface de la Terre sont généralement comprises entre $10^{-14}$ et $10^{-12}$ $m^{-2/3}$; elles décroissent brusquement au-dessus de la couche limite planétaire (entre 1,5 et 2,5 km de hauteur). Au milieu de la troposphère, $C_n^2$ a généralement de faibles valeurs, comprises entre $10^{-17}$ et $10^{-16}$ $m^{-2/3}$. $C_n^2$ présente souvent une augmentation relative au voisinage de la tropopause, hauteur au-dessus de laquelle il décroît de nouveau [Mathur et Ramarao, 1977].

On trouvera des renseignements plus détaillés sur ces sujets dans [IUCRM Symposium, 1969 et 1973].

### 3. Variation de la teneur en vapeur d'eau et en oxygène au niveau du sol

La vapeur d'eau et l'oxygène atmosphériques sont la cause d'une absorption des ondes millimétriques, surtout au voisinage de leurs raies d'absorption (voir le Rapport 719). La concentration de l'oxygène atmosphérique est relativement constante, contrairement à celle de la vapeur d'eau.

Les Fig. 9 et 10 donnent, respectivement pour les mois de février et d'août, les moyennes mensuelles de la concentration de la vapeur d'eau, ρ (appelée également humidité absolue ou teneur en vapeur d'eau) [Bean et Dutton, 1966].

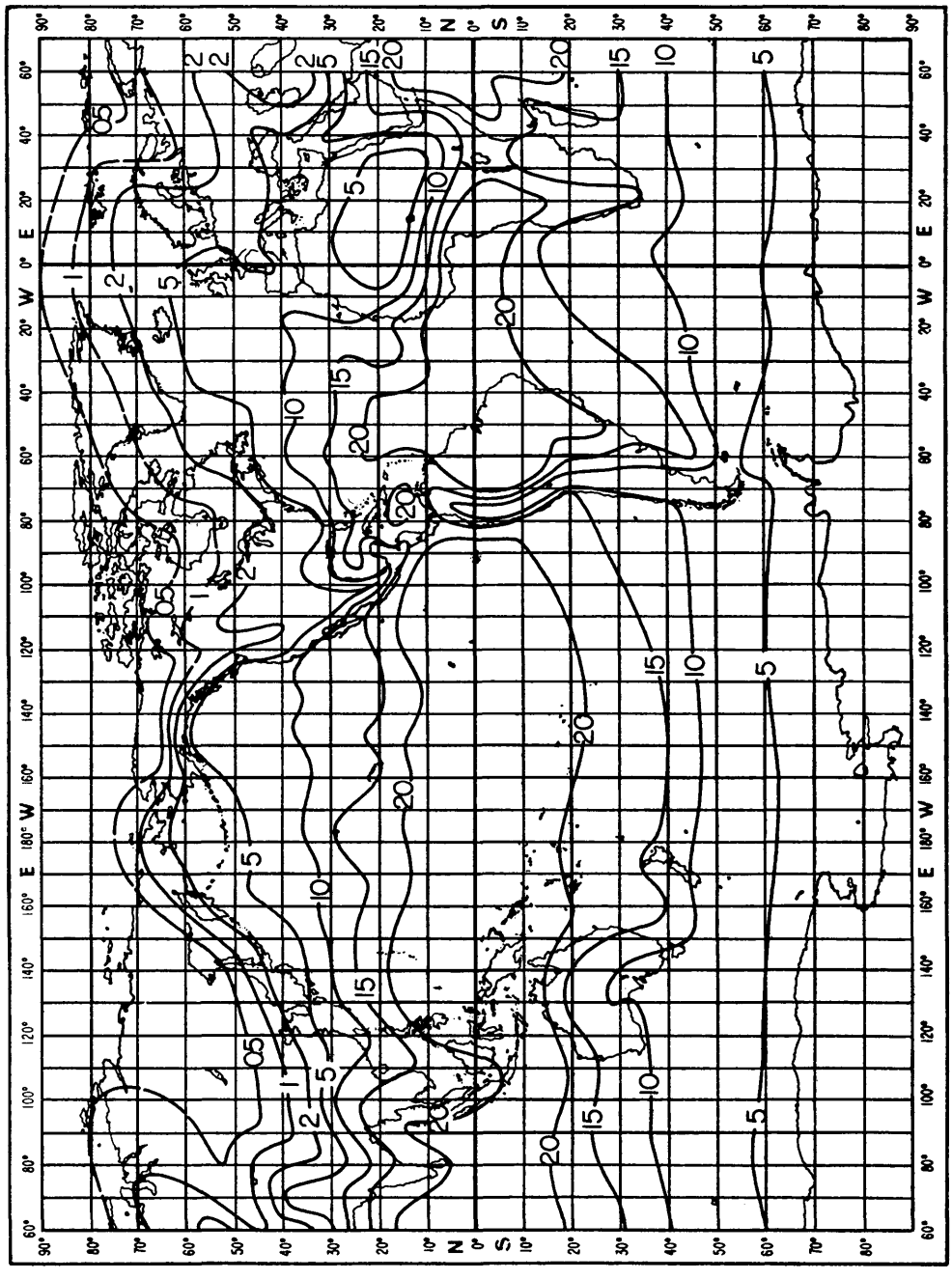


FIGURE 9 – *Concentration de la vapeur d'eau (g/m³) : février*

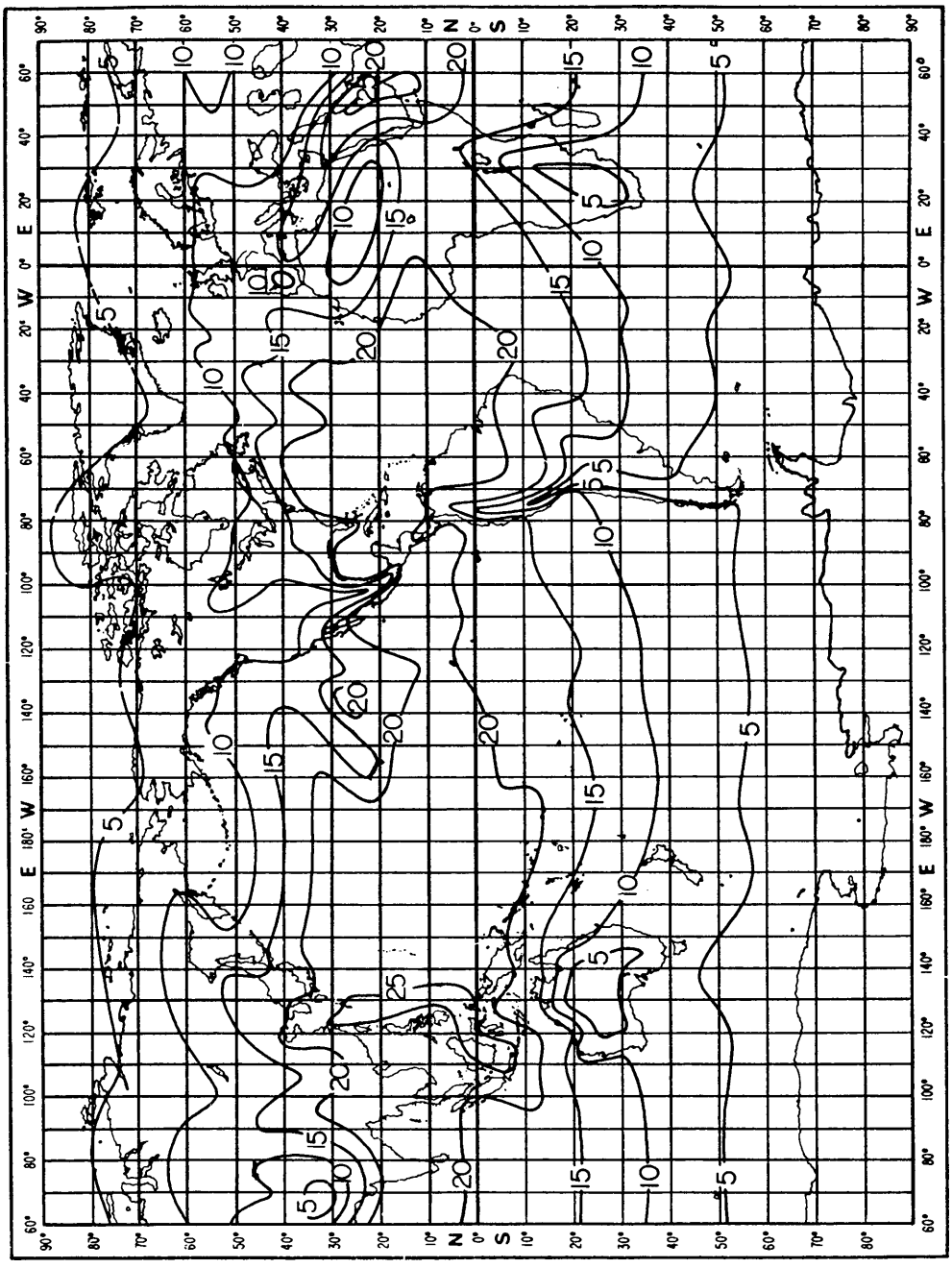


FIGURE 10 – *Concentration de la vapeur d'eau (g/m³) : août*

On a une relation simple entre la concentration et la pression de la vapeur d'eau:

$$\rho = 216{,}7 \frac{e}{T} \tag{8}$$

où

$\rho$: concentration de la vapeur d'eau (g/m$^3$)
$e$: pression de la vapeur d'eau (mb)
$T$: température absolue (K)

La concentration de la vapeur d'eau est une grandeur extrêmement variable. En première approximation, on peut admettre que les fluctuations de $\rho$ dans le temps obéissent à une loi normale, avec un écart type égal au quart environ de sa moyenne.

Il faut noter que la variation statistique de la concentration de la vapeur d'eau est influencée par la température de l'atmosphère. L'humidité relative dépasse rarement 100%, ce qui implique que le maximum de concentration de la vapeur d'eau ne dépasse pas la valeur correspondant à la saturation, à la température de l'atmosphère.

## 4. Caractéristiques des précipitations pluviales

Comme les pluies tombent toujours sur une étendue limitée, elles interceptent une partie plus ou moins grande d'un trajet de propagation. On peut donc diviser en deux parties l'étude des caractéristiques de ces précipitations: caractéristiques statistiques de l'intensité de précipitation pluviale en un point et caractéristiques spatiales des pluies.

### 4.1 *Caractéristiques statistiques de l'intensité de précipitation pluviale en un point*

#### 4.1.1 *Distribution cumulative du taux de précipitation*

Chaque fois que cela est possible, il faut s'efforcer d'utiliser les valeurs expérimentales de l'intensité de précipitation pour déterminer sa distribution cumulative. Cependant, pour certaines régions de la Terre, ces valeurs expérimentales n'existent pas. On a essayé de trouver une méthode pour déterminer cette distribution cumulative en un endroit quelconque. L'utilisation d'un seul paramètre, tel que la hauteur annuelle de précipitation en un point, ne semble pas entièrement satisfaisante; elle pourrait sans doute être améliorée par l'introduction d'un second paramètre. Une méthode [Rice et Holmbert, 1973] est fondée à la fois sur la hauteur pluviométrique annuelle totale et la hauteur des précipitations orageuses.

En attendant de pouvoir mettre à l'essai des méthodes améliorées, on propose de continuer à utiliser une méthode approximative, qui consiste à considérer plusieurs zones hydrométéorologiques. La Fig. 11 présente une estimation des distributions cumulatives de l'intensité de précipitation pour cinq zones et les limites approchées de ces zones sont dessinées sur la Fig. 12. Ces courbes ne devraient être utilisées que dans le cas où aucune information plus précise pour l'endroit considéré n'est disponible. En réalité, la ligne de démarcation entre deux zones quelconques n'est pas définie de façon précise et la distribution cumulative varie fortement à l'intérieur d'une même zone et d'une année à l'autre. Un document [CCIR, 1970-74] contient des statistiques pluviométriques détaillées pour la région de l'U.R.S.S. Des subdivisions des régimes pluviométriques indiquées sur les Fig. 11 et 12 ont été suggérées [Rice et Holmberg, 1973; Dutton et autres, 1974].

Les mesures faites dans de nombreux pays montrent que pour de faibles pourcentages du temps, c'est-à-dire inférieurs à 0,01%, il existe de très grandes variations du taux de précipitation d'une année sur l'autre. De ce fait, on aura peut-être besoin d'une très longue durée, certainement supérieure à 10 ans, pour définir le régime pluviométrique d'une région. On a fait une analyse des moyennes maximales (sur 5 minutes) du taux de précipitation (0,001%) obtenues chaque année sur une période de 25 ans, en un emplacement donné de la zone hydrométéorologique 2; cette analyse a montré qu'il faut au moins 15 années d'observation pour pouvoir estimer la valeur du taux de précipitation maximal, intégré sur 5 minutes, qui se produit en moyenne une fois par an, avec une erreur type d'estimation inférieure à 10% de la moyenne [Crane, 1977]. L'analyse a révélé également qu'on peut obtenir la même erreur type d'estimation en procédant sur une durée d'observation totale plus courte, en un plus grand nombre de points d'observation, dans la même région climatique, à condition d'avoir prelevé un même nombre d'échantillons indépendants (sur une année). [Altman, 1977] a constaté également que la distribution des valeurs extrêmes (taux de précipitation moyen maximal sur 5 minutes) obéit, en première approximation, à une loi log-normale; cet auteur a estimé qu'il suffit d'avoir des données sur 10 ans pour pouvoir estimer le taux de précipitation maximal sur 5 minutes qui se produit une fois en 50 ans.

On a recommandé des modèles de distribution, à utiliser pour l'estimation statistique du taux de précipitation pluviale ponctuel, sur la base d'observations de courte durée [Misme et Fimbel, 1975; Lin, 1975; Morita et Higuti, 1976] (voir le Rapport 721). Toutefois, il faut faire des observations sur de longues durées pour pouvoir établir la validité des fonctions de distribution log-normales ou gamma – qui sont les modèles recommandés actuellement – en un emplacement donné [Fedi et Merlo, 1977]. Des résultats obtenus récemment semblent indiquer que les modèles de distribution sont plus satisfaisants si on les applique uniquement à l'apparition d'un type de pluie bien défini (voir en annexe la description de ces types de pluie). Mais, ici encore, il est nécessaire d'avoir une durée d'enregistrement suffisamment longue pour pouvoir vérifier la validité de chaque modèle.

#### 4.1.2 *Données statistiques sur la durée des chutes de pluie*

Les pluies intenses se produisent dans des cellules dont les dimensions vont de un à plusieurs kilomètres. Le taux de précipitation pour une pluie de grande intensité demeure élevé tant que la cellule passe au-dessus du point d'observation. La distribution statistique de la durée des pluies dont le taux de précipitation dépasse des seuils déterminés présente de l'intérêt pour la prévision de la fiabilité de transmission. Des études faites au Japon [Yamada et autres, 1978] et en France [Misme, 1974] indiquent que la distribution est, en première approximation, log-normale. En Italie [Fedi et Merlo, 1977], on a constaté que les durées médianes des pluies sont inversement proportionnelles à la valeur du seuil fixé pour le taux de précipitation.

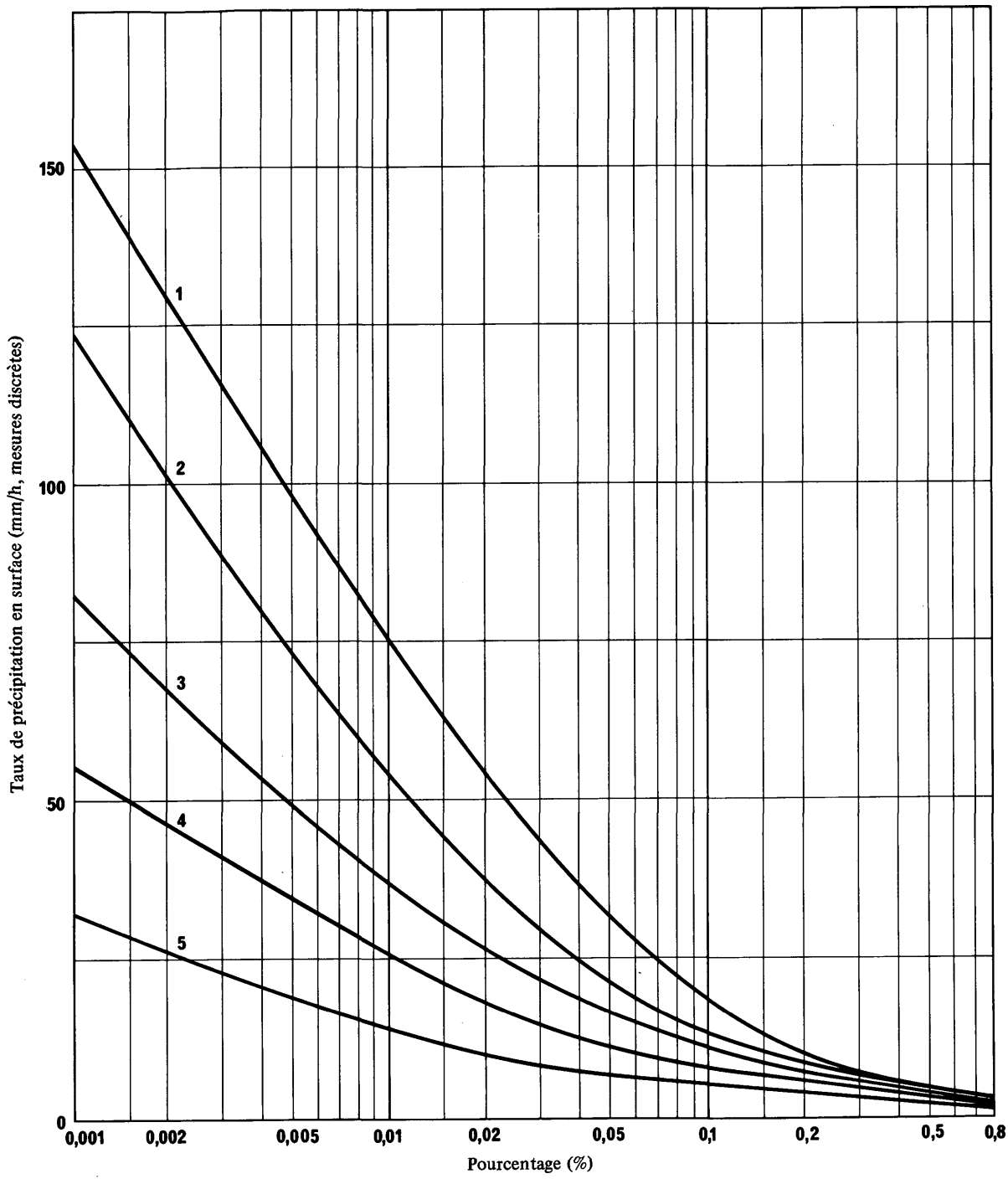



FIGURE 11 – *Pourcentage du temps d'une année moyenne pendant lequel le taux de précipitation indiqué est dépassé, pour les cinq zones hydrométéorologiques*

## 4.2 *Caractéristiques spatiales des pluies*

L'Annexe I donne une description des divers types de pluie.

Il est bien connu qu'une précipitation n'a pas une structure homogène. De nombreux travaux entrepris dans des pays différents ont conduit à caractériser les chutes de pluie par un coefficient d'autocorrélation dans l'espace. Cependant, aucune loi générale ne paraît se dégager de ces études, ce coefficient étant essentiellement variable. Au Japon, on a mis au point une formule qui exprime la distribution de probabilité conditionnelle des taux de précipitation en deux points situés sur une droite de la surface du sol donnée. Pour ce pays, cette relation ne dépend ni du lieu ni du pourcentage du temps [Yokoi et autres, 1973] quand celui-ci est inférieur à 0,1% d'une période d'au moins une année.

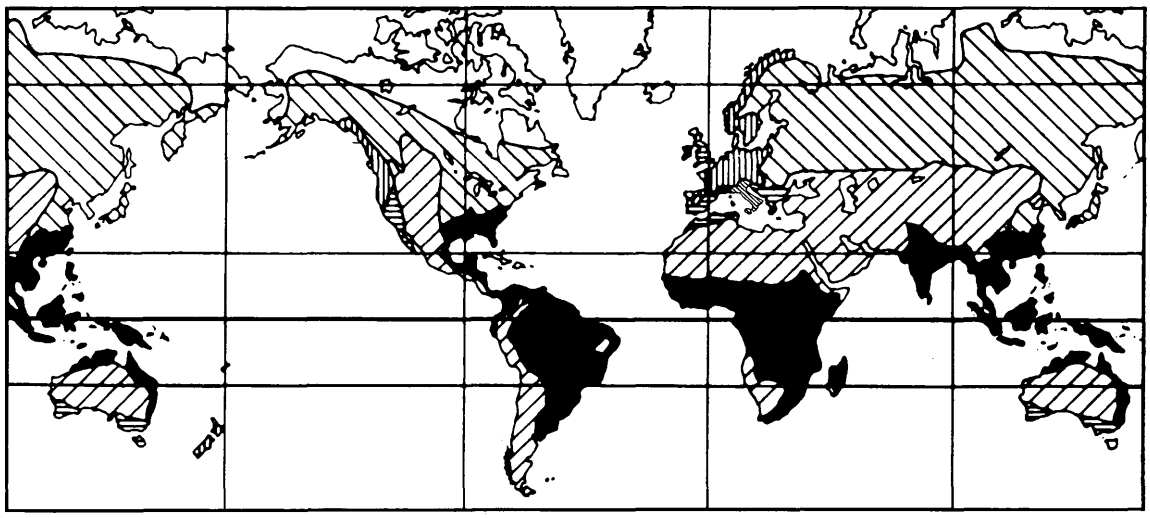


FIGURE 12 – *Zones hydrométéorologiques correspondant aux distributions du taux de précipitation représentées à la Fig. 11*

1
2
3
4
5

Des mesures de précipitations par radiodétection, faites à Ottawa (Canada) [Strickland, 1974], ont fourni des distributions de la taille des cellules pluviales (cause de l'affaiblissement), de leur espacement et de leur orientation. Les distributions de taille sont log-normales, avec une médiane et un écart type qui dépendent du niveau d'affaiblissement. L'espacement entre les cellules pluviales manifestées par l'affaiblissement correspondait à la distribution de Rayleigh, avec une moyenne de 29 km. La distribution de l'orientation des droites reliant des paires de cellules était irrégulière, avec un minimum prononcé.

Aux Etats-Unis d'Amérique, des mesures faites au Colorado montrent que les averses de convection, qui ont une grande intensité de précipitation sous les climats tempérés, varient de taille au cours de leur cycle de vie et peuvent atteindre des diamètres de 15 à 20 km, bien que l'on ait pu évaluer leur dimension «moyenne» à 8 km. De même, les taux de précipitation peuvent varier considérablement sur de courtes distances au cours d'une tempête. D'autres mesures, faites au moyen du radar de Wallops Island (Virginie), ont permis d'élaborer un modèle de structure cellulaire et de distribution de la taille des cellules. Les données obtenues ont été utilisées pour prédire l'amélioration due à la diversité [Goldhirsh et Robinson, 1975].

La dimension horizontale moyenne des cellules varie avec le taux de précipitation, comme le montre la Fig. 13, dont les données se rapportent aux zones hydrométéorologiques 1, 2 et 3 [Kinase et autres, 1973; Debrunner et Liniger, 1975].

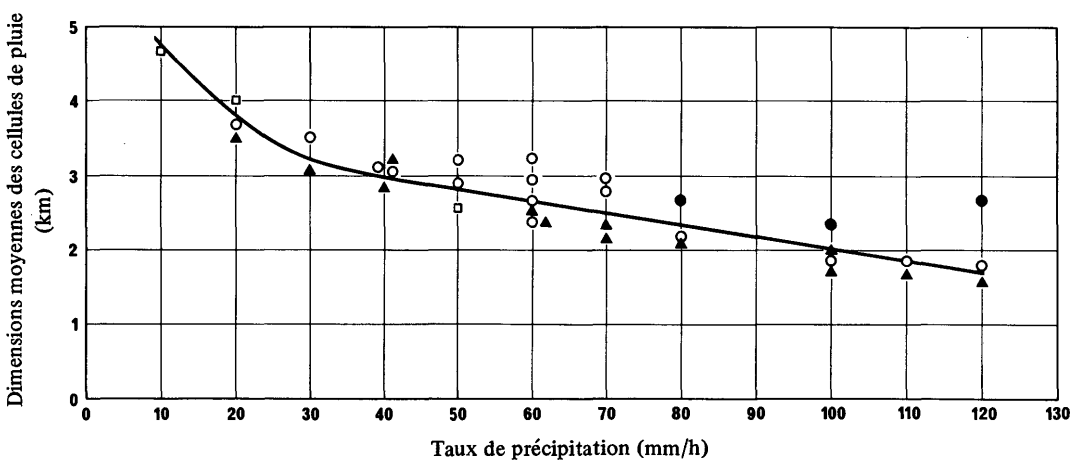



FIGURE 13 – *Dimensions moyennes des cellules de pluie en fonction du taux des précipitations*

- ○ D'après des mesures d'affaiblissement faites au Japon (1968, 1969, 1970), zone hydrométéorologique 2
- ▲ D'après des mesures d'affaiblissement faites en Malaisie (1971, 1972), zone hydrométéorologique 1
- □ D'après des observations au radar météorologique faites en Suisse (1973), zone hydrométéorologique 3
- ● D'après des observations pluviométriques faites en France (1977), zone hydrométéorologique 3

Pour le Japon, la France et la Malaisie, il s'agit de mesures indirectes, qu'il faut donc utiliser avec prudence.

On a effectué au Royaume-Uni des études sur l'intensité des précipitations et mis au point des modèles tridimensionnels qui caractérisent la structure spatio-temporelle des pluies [Harden et autres, 1977].

4.3 *Profils verticaux de la diffusion par les hydrométéores*

La variation statistique de l'intensité des précipitations en fonction de la hauteur joue un rôle important dans la prévision de l'affaiblissement et du brouillage dus à la diffusion par les hydrométéores. Des observations par radiodétection montrent que, pour un pourcentage du temps donné, la réflectivité est indépendante de la hauteur, au-dessous de l'isotherme 0 °C (niveau de fusion). Au-dessus de ce niveau, la diffusion est due principalement à la glace et à la neige. Au-dessous de l'isotherme 0 °C, les hydrométéores liquides (pluie) contribuent à l'affaiblissement; au-dessus de cet isotherme, la glace et la neige n'apportent aucune contribution, sauf aux fréquences supérieures à environ 60 GHz.

Le facteur de réflectivité pour les impulsions radar, $Z$, se définit comme la somme des sixièmes puissances des diamètres (à l'état de fusion) des hydrométéores; cette grandeur s'exprime généralement en $mm^6/m^3$. Le facteur de réflectivité équivalent, $Z_e$, est un paramètre utilisé pour représenter la diffusion causée par la pluie:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \cdot \frac{\eta}{|K|^2} \cdot 10^{18} \qquad (9)$$

où

$\eta$: aire de la section de diffusion par unité de volume ($m^2/m^3$),

$\lambda$: longueur d'onde (m),

$$|K|^2 = \left|\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right|^2 = \quad 0{,}93 \text{ pour une longueur d'onde de } 0{,}1 \text{ m},$$

$\varepsilon$: constante diélectrique de l'eau.

Pour des gouttes d'eau de petit diamètre, comme on en rencontre dans les pluies d'intensité faible à moyenne, et pour les fréquences inférieures à environ 7 GHz, la diffusion de Rayleigh s'applique, et l'on a $Z = Z_e$. A noter que c'est la constante diélectrique de l'eau qu'on utilise dans l'expression de la réflectivité équivalente, même lorsque la diffusion est due à la glace. La réflectivité équivalente est une grandeur utile dans le cas de la diffusion par la pluie, parce qu'elle est indépendante de la longueur d'onde quand celle-ci dépasse environ 4 cm (7 GHz). On a besoin de connaître cette réflectivité équivalente pour calculer le brouillage dû à la pluie (Rapport 569-1).

On obtient la réflectivité équivalente par une mesure de puissance à l'aide d'un système de radiodétection. Cette grandeur est souvent exprimée dans l'unité dB$Z$:

$$\text{dB}Z = 10 \log_{10} (Z) \qquad \text{où} \qquad Z = (Z_e/Z_0) \qquad (10)$$

où $Z_0$ est proportionnel à la puissance reçue en provenance d'un volume de diffusion ayant une réflectivité de 1 $mm^6/m^3$.

On a la relation suivante entre la réflectivité et le taux de précipitation, $R$ (mm/h) (dans la pluie seulement):

$$Z = 400\, R^{1{,}4} \qquad (11)$$

Les observations montrent que la réflectivité équivalente est essentiellement constante entre la surface de la Terre et la hauteur moyenne de la base de l'isotherme 0 °C; ensuite, la réflectivité décroît à raison d'environ 7 dB/km au-dessus de cette hauteur. Les nuages de glace (cirrus) contribuent également à la réflectivité équivalente au-dessus de 6 km. La contribution des nuages de glace peut être représentée par un modèle dans lequel la réflectivité décroît à raison d'environ 2 dB/km au-dessous de la région correspondant à la contribution maximale de ces nuages et à raison d'environ 7 dB/km au-dessus de cette région. Les Fig. 14a à 14c représentent les modèles correspondants pour chaque zone hydrométéorologique, à la fois pour les nuages de glace et la pluie. La Fig. 14b contient également des résultats de mesure obtenus au Royaume-Uni, au Canada et aux Etats-Unis [CCIR, 1974-78; Hall et Goddard, 1978; Olsen et Lammers, 1978].

Pour l'élaboration de ces modèles, on a supposé que les caractéristiques des nuages de glace dépendent seulement de la latitude. Les régions climatiques 2, 3 et 4, qui sont situées aux latitudes moyennes, sont caractérisées par des statistiques identiques concernant l'apparition de nuages de glace au-dessus de 8 km. La région climatique 1 est tropicale. La région 5 s'étend à la fois sur les tropiques et les latitudes moyennes. Aux latitudes moyennes, la courbe relative à la région 5 doit présenter un premier point d'inflexion à la hauteur de la couche de fusion (au-dessous de 6 km, hauteur correspondant aux tropiques); au-dessus de 9 km, cette courbe doit avoir l'allure correspondant à la zone hydrométéorologique N° 1.

*Note 1.* – Comme dans l'utilisation des statistiques pluviométriques de la Fig. 11, il est recommandé ici d'utiliser des données locales sur les taux de précipitation et sur la hauteur de l'isotherme 0 °C, lorsque ces données sont disponibles, dans le but d'améliorer la spécificité des modèles représentés dans les Fig. 14a à 14c; il s'agit, en l'occurrence, de modifier la valeur au sol de $Z$ et la hauteur de variation du gradient. La partie supérieure de la courbe est d'application plus générale.

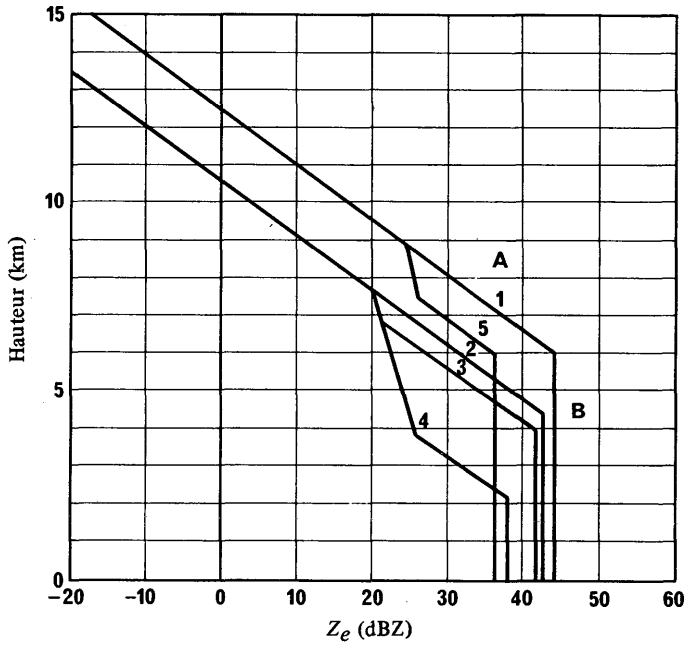
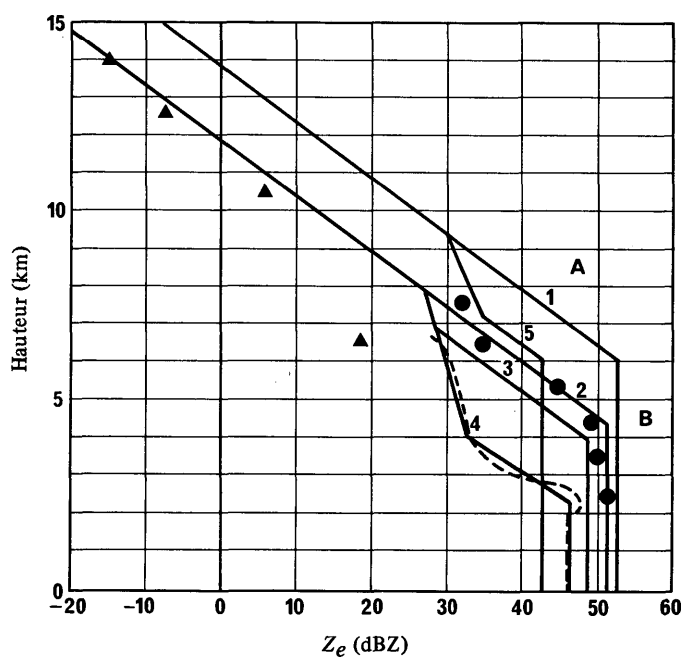



FIGURE 14*a* – *Facteur de réflectivité équivalent, $Z_e$ (dBZ)*

(Pour chacune des zones indiquées dans la Fig. 12)

0,1 % d'une année

A : nuages de glace
B : pluie




| Mesures: | | Zone hydrométéorologique: |
|---|---|---|
| — — — | Royaume-Uni (Doc. 5/199, Annexe II) | 4 |
| ● | Etats-Unis (Doc. 5/169) | 2 |
| ▲ | Canada (Doc. 5/204) | 2 |

FIGURE 14*b* – *Facteur de réflectivité équivalent, $Z_e$ (dBZ)*

(Pour chacune des zones indiquées dans la Fig. 12)

0,01 % d'une année

A : nuages de glace
B : pluie

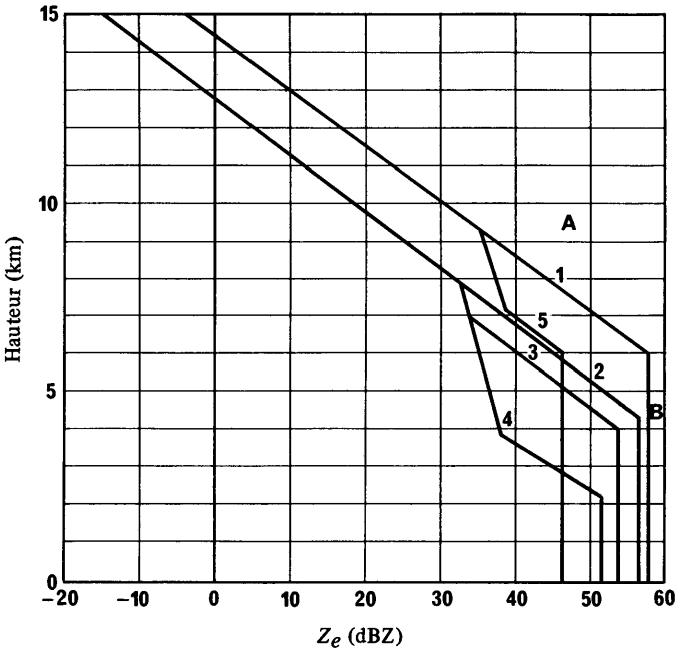



FIGURE 14c – *Facteur de réflectivité équivalent, $Z_e$ (dBZ)*

Pour chacune des zones indiquées dans la Fig. 12)

0,001 % d'une année

A : nuages de glace
B : pluie

*Note 2.* – Les données sur la réflectivité pour les nuages de glace des Fig. 14a, 14b et 14c ont été calculées à l'aide de la formule (9) en supposant que la diffusion était due à de l'eau en fines gouttes. Les données peuvent ainsi s'appliquer à tout autre problème de diffusion par la pluie, en utilisant le formule (9) avec les mêmes hypothèses.

## 5. Tempêtes de sable et de poussière

Les tempêtes de sable et de poussière sont des nuages épais formés par des particules de sable et de poussière en suspension. Dans les fortes tempêtes, la portée de visibilité peut être réduite à 10 mètres ou moins et la première peut s'élever jusqu'à plus d'un millier de mètres au-dessus du sol et s'étendre sur des centaines de kilomètres en surface.

Les aspects météorologiques des tempêtes de sable et de poussière ont été étudiés par de nombreux auteurs [Lawson, 1970; Farquharson, 1937; Ing, 1969; Bagnold, 1971]; on en a observé au Soudan, en Libye, dans le sud de l'Egypte, en Iraq, dans le désert d'Arabie, en Inde, en U.R.S.S., en Chine centrale, aux Etats-Unis d'Amérique et en Australie.

Les principaux constituants des tempêtes de sable et de poussière sont des particules de sable et d'argile, dont les dimensions respectives sont généralement de 0,015 et 0,008 cm. On peut établir une relation empirique entre la concentration de ces particules et la visibilité optique.

Il y a lieu de poursuivre les études sur les caractéristiques des tempêtes de sable et de poussière.

# ANNEXE I

## TYPES DE PLUIE

- La pluie du type *stratiforme,* telle qu'on la rencontre dans les climats tempérés, a généralement des intensités allant jusqu'à 20 mm/h; elle s'étend en altitude de 4 à 6 km, horizontalement jusqu'à des centaines de kilomètres et dure plusieurs heures.
- La pluie du type *convectif* peut s'étendre en altitude jusqu'à 10 km, mais elle se présente comme une cellule locale de pluie intense, soit à l'intérieur d'une vaste zone d'orage, soit complètement isolée. Son étendue horizontale est de l'ordre de quelques kilomètres. Elle peut avoir des taux de précipitation très élevés, mais sa durée est de l'ordre d'une minute. Ce sont ces orages convectifs qui donnent le plus souvent les fortes pluies observées en Europe et en Amérique du Nord.
- En revanche, les pluies de *mousson* présentent des intensités très élevées pendant plusieurs heures par jour et s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres.
- La pluie due à des *orages cycloniques tropicaux* (ouragans et typhons). Il s'agit d'orages circulaires en déplacement, de 50 à 200 km de diamètre, caractérisés par une étendue verticale allant jusqu'à 8 km et par des taux de précipitation élevés mais variables.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


AKIYAMA, T. [1971] Tropospheric radio-refractivity gradient over Japan and its vicinity. *Electronics and Communications in Japan*, 54, 4, 94-100.

AKIYAMA, T. et HATANO, K. [1977] Radio-refractivity gradient in South-East Asia. *Trans. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan*, E-60, 1, 21-22.

AKIYAMA, T. [1977] Studies on the radio-refractive index in the tropospheric atmosphere. *Rev. Elect. Comm. Labs. NTT.*, 25, 1-2, 79-95.

ALTMAN, F. J. [1977] Occurrence of intense rainfall. Proc. URSI Symposium on propagation in non-ionized media, La Baule, France.

BAGNOLD, R. A. [1971] The physics of blown sand and desert dunes. Chapman and Hall.

BEAN, B. R. et MEANY, F. M. [1955] Some applications of the monthly median refractivity gradient in tropospheric propagation. *Proc. IRE*, 43, **10**, 1419-1431.

BEAN, B. R., HORN, J. D. et OZANICH, A. M. Jr. [novembre 1960] Climatic charts and data of the radio-refractive index for the United States and the World. Monographie de la NBS, N° 22, Supt. of Docs., US Government Printing Office, Washington, DC.

BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radiometeorology,* Dover, New York, Etats-Unis d'Amérique.

BEAN, B. R., CAHOON, B. A., SAMSON, C. A. et THAYER, G. D. [1966] A world-wide atlas of radio-refractive index. Monographie N° 1, Environmental Sciences Services Administration, US Government. Printing Office, Washington, DC.

BOTHIAS, L. et MISME, P. [novembre-décembre 1964] Limites d'utilisation de l'indice de refraction au sol. *Ann. des télécomm.*, Vol. 19.

CRANE, R. K. [1976] Refraction effects in the neutral atmosphere. *Methods of experimental physics*, Vol. 12, Astrophysics, partie B, Radio Telescopes, Academic Press, New York.

CRANE, R. K. [1977] Prediction of the effects of rain on satellite communication systems. *Proc. IEEE,* Vol. 65, 3.

DEBRUNNER, W. E. et LINIGER, M. [août 1975] Einfluss der Struktur von Regengebieten auf die Ausbreitung von Mikrowellen (Influence of the structure of rain areas on microwave propagation). *PTT Techn. Mitteilungen,* Vol. 53, **8**, Berne, Suisse.

DOUGHERTY, H. T. [1968] A survey of microwave fading mechanism, remedies and applications. COM-71-50288, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

DOUGHERTY, H. T. et HART, B. A. [1977] Anomalous propagation and interference fields, OT Report, PB 262477, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

DUTTON, E. J., DOUGHERTY, H. T. et MARTIN, R. F. [1974] Prediction of european rainfall and link performance coefficients at 8 to 306 Hz. AD A000804, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

FARQUHARSON, J. S. [1937] Habob and instability in the Sudan. *Q.J.R. Met. Soc.*, **63**, 393.

FEDI, F. et MERLO, U. [1977] Statistical data on point rainfall intensity for the design of radio-relay systems at frequencies above 10 GHz. URSI open symposium on propagation in non-ionized media, La Baule, France.

GOLDHIRSH, J. et ROBISON, F. L. [mars 1975] Attenuation and space diversity statistics calculated from radar reflectivity data of rain. *IEEE Trans. Antennae and Propagation*, Vol. AP-23, **2**.

HALL, M. P. M. et COMER, C. M. [1969] Statistics of tropospheric radio-refractive index soundings taken over a 3-year period in the United Kingdom. *Proc. IEEE*, Vol. 116, **5**, 685-690.

HALL, M. P. M. et GODDARD, J. W. F. [1978] Variation with height of the statistics of radar reflectivity due to hydrometeors. *Elecronics Letters*, 14, N° 7.

HARDEN, B. N., NORBURY, J. R. et WHITE, W. J. K. [1977] Measurements of rainfall for studies of millimetric radio attenuation. *JIEE* (en préparation).

ING, G. K. T. [1969] Dust storm over central China. *Weather*, **27**, 136.

IUCRM Symposium [1969] *Radio Sci.*, **4**.

IUCRM Symposium [1973] Boundary Layer Meteorology, 4.

KALININ, A. J. [1964] *Calculation of radio-relay links* (en russe). Sviaz, Moscou, 128-135.

KINASE, A. et autres [octobre 1973] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz band at higher angles of elevation. Note des Laboratoires NHK, Série 171, Japon.

LANE, J. A. [1961] The radio-refractive index gradient over the British Isles. *Journ. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 21, 157-166.

LAWSON, T. J. [1970] Habob structure at Khartoum. *Weather*, 26, 3, 105.

LIN, S. H. [juillet-août 1975] A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths. *BSTJ*, Vol. 54, **6**.

MATHUR, N. C. et RAMARAO, C. T. [mars 1977] Rake probing of atmospheric refractive structure. *Journ. of the Institution of Electronic and Telecommunication Engineers*, Inde.

MISME, P. [1958b] Corrélation entre le champ à grande distance et un nouveau paramètre radiométéorologique (The correlation between the field-strength at a great distance and a new radiometeorological parameter). *Trans. of PGAP*, Ap-6, 3.

MISME, P., BEAN, B. R. et THAYER, G. D. [août 1960] Models of the atmospheric radio-refractive index. *Proc. IRE*, 48, **8**.

MISME, P. [1974] Analyse statistique du régime pluvieux de la région de Paris (Statistical analysis of the rainfall system in the Paris region). *Journ. Rech. Atm.*, Vol. 8, **1/2**.

MISME, P. et FIMBEL, J. [mai-juin 1975] Détermination théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique. *Ann. des télécomm.*, Vol. 30, **5-6**.

MORITA, K. et HIGUTI, I. [juillet-août 1976] Prediction methods for rain attenuation distribution of micro and millimeter waves. *ECL Review*, Vol. 24, **7-8**.

OLSEN, R. L. et LAMMERS, U. H. W. [1978] Bistatic radar measurements of ice-cloud reflectivities in the upper troposphere. *Electronics Letters*, 14, N° 7.

PAWLOWSKI, W. [1975] On the influence of the synoptic situation on the distribution of radiometeorological parameters (en polonais). *Archiwum Elektrotechniki*, Vol. 24, 1.

RICE et HOLMBERG [octobre 1973] Cumulative time statistics of surface point rainfall rates. *Trans. IEEE Comm.*, Doc. 10.

STRICKLAND, J. I. [1974] Radar measurements of site-diversity improvement during precipitation. *Journ. Rech. Atm.*, Vol. 8, 1-2, 451.

TATARSKII, V. I. [1967] *Wave propagation in turbulent atmosphere,* Naveka, Moscou.

*U.S Standard Atmosphere Supplements* [1966] Environmental Sci. Serv. Administration, Dept. of Commerce, Washington, DC.

WICKERTS [1968] A radiometeorological standard atmosphere (en suédois). Research Institute of National Defence, Dep. 3, Rapport A 3704-60.

YAMADA, M., OGAWA, A., FURUTA, O. et YOKOI, H. [novembre-décembre 1977] Rain depolarization measurement using INTELSAT-IV satellite in 4-GHz band at a low elevation angle. *Ann. des télécomm.*, Vol. 32.

YOKOI, H., YAMADA, M. et OGAWA, A. [octobre 1973] Measurement of precipitation attenuation for satellite communication in low elevation angles. Inter-Union Commission on Radio Meteorology, Nice, France.

*Documents du CCIR*

[1970-74]: 5/79 (U.R.S.S.);

[1974-78]: 5/169 (États-Unis d'Amérique).

---

RAPPORT 718

# EFFETS DE LA RÉFRACTION TROPOSPHÉRIQUE SUR LA PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES

(Question 2-3/5)

(1978)

## 1. Introduction

Les variations de l'indice de réfraction sont à l'origine des phénomènes de propagation suivants, qui sont des fonctions du temps et de l'espace:

- courbure des rayons et fluctuations de l'angle d'arrivée
- propagation guidée (conduits)
- défocalisation
- fluctuations d'amplitude et de phase
- déphasage et variation du déphasage
- propagation par diffusion troposphérique.

Certains de ces phénomènes sont liés aux caractéristiques macroscopiques de l'atmosphère, d'autres à la structure fine de l'atmosphère.

On trouvera dans le Rapport 563-1 un examen des variations du coïndice de réfraction, $N$, en fonction des conditions météorologiques.

## 2. Courbure des rayons

### 2.1 *Généralités*

Un rayon radioélectrique traversant la couche inférieure (non ionisée) de l'atmosphère subit une courbure en raison de la variation du coïndice de réfraction. Ce phénomène ne dépend pratiquement pas de la fréquence, et son ampleur est d'autant plus grande que les angles de site sont plus petits.

Du point de vue théorique, le calcul de la réfraction est bien connu [Bean et Dutton, 1966]. On rappelle que la courbure $1/\rho$ du trajet radioélectrique en un point est donnée par:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\cos \varphi}{n} \cdot \frac{dn}{dh} \qquad (1)$$

où $n$ est l'indice de réfraction, $\varphi$ l'angle du trajet avec l'horizontale au point considéré et $dn/dh$ le gradient vertical de l'indice de réfraction. La variabilité de ce gradient détermine celle de la courbure.

Si, dans une couche atmosphérique, le gradient vertical est égal à $-157$ unités $N$/km *, la courbure des trajets est égale à celle de la surface terrestre. En général, la valeur du gradient est supérieure à $-157$ unités $N$/km. Toutefois, pendant un petit pourcentage du temps, qui dépend du climat, le gradient vertical est inférieur à cette valeur. En pareil cas, il y a formation de conduits radioélectriques dans la couche atmosphérique considérée (voir le § 2.2.2 ci-dessous).

---

* Pour les définitions de $n$ et $N$, voir l'Avis 310-4.

*Note.* – On admet dans ce paragraphe que l'indice de réfraction est sensiblement constant sur une épaisseur de couche atmosphérique de l'ordre d'une longueur d'onde. Il s'ensuit que, pour les fréquences inférieures à environ 1 MHz, il faut étudier ce problème par des méthodes qui ne reposent pas sur cette hypothèse.

2.2 *Trajets presque horizontaux*

2.2.1 *Rayon équivalent de la Terre*

L'équation donnée au § 2.1 se simplifie pour $\varphi \simeq 0$:

$$1/\rho \simeq \frac{dn}{dh} \tag{2}$$

Moyennant une transformation bien connue, on peut considérer que l'onde se propage en ligne droite au-dessus d'une surface terrestre fictive de rayon équivalent $ka$, défini par:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} \tag{3}$$

En utilisant des moyennes annuelles, on a ainsi introduit un modèle exponentiel moyen d'atmosphère auquel correspond un rayon terrestre équivalent égal au rayon terrestre réel multiplié par 4/3. Dans le cas général, ce facteur, 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 effectués simultanément le long du trajet de propagation. La distribution des valeurs de $k$ ainsi déterminées présente moins de variabilité que celle déduite de mesures météorologiques prises en des points isolés. Cette variabilité diminue lorsque la distance augmente.

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

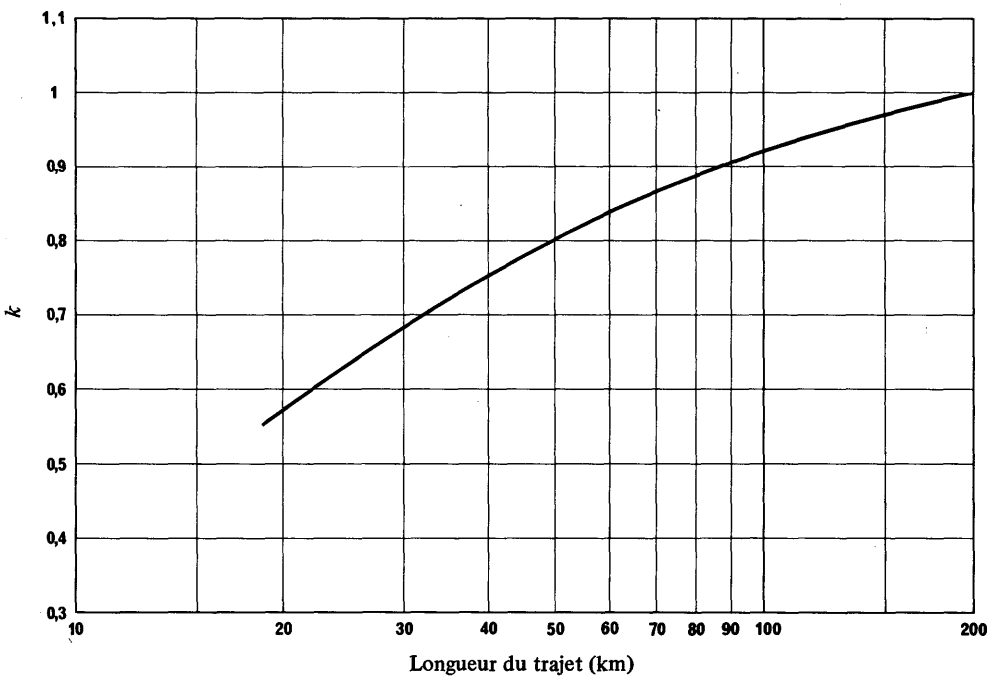



FIGURE 1 – *Valeur minimale pratique de k dépassée pendant approximativement 99,9% du temps*

(Climat tempéré continental)

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

Des mesures de l'angle d'arrivée effectuées en République fédérale d'Allemagne à la fréquence 515 MHz, sur un trajet à visibilité directe de 70 km, montrent que la moyenne de $k$ prise sur la longueur de ce trajet ne varie pas autant qu'on pourrait s'y attendre d'après des observations météorologiques faites en un seul point de ce trajet.

Des mesures de réfraction sur un trajet de 55 km à visibilité directe au Royaume-Uni [Bell, 1967] ont indiqué une valeur pratique de $k$ dépassant 0,9 pendant 99,9% du temps. Des mesures faites au Japon à la fréquence 6,7 GHz sur un trajet maritime de 112,7 km, avec réflexion des ondes sur la surface de la mer, ont indiqué une valeur pratique de $k$ dépassant 0,99 pendant 99,9% du temps.

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

2.2.2 *Propagation guidée*

Si, dans une couche atmosphérique, le gradient vertical du coïndice de réfraction est inférieur à $-157$ unités $N$/km, le rayon de courbure des trajets est inférieur au rayon de la surface terrestre. Toutefois, l'épaisseur de la couche atmosphérique pour laquelle cette condition est vérifiée ne dépasse jamais quelques centaines de mètres. La partie de l'atmosphère ainsi définie s'appelle un conduit atmosphérique. L'énergie ne se propage plus selon les lois qui s'appliquent dans l'espace libre (voir l'Avis 525). On observe une concentration de l'énergie dans le conduit, c'est-à-dire un affaiblissement minime, si bien que l'onde se propage à très grande distance et peut causer des brouillages (voir le Rapport 569-1). Inversement, au-dessus du conduit, la densité d'énergie est très faible, ce qui peut donner lieu à des évanouissements profonds si les antennes se trouvent dans cette partie de l'atmosphère.

Il y a lieu de noter aussi que seuls les rayons qui sont émis sous un angle de site supérieur à une certaine valeur (qui est presque toujours plus petite que 2°) sont capables de sortir du conduit.

2.3 *Trajets obliques*

2.3.1 *Variation de l'angle de site et courbure*

La diminution de l'indice de réfraction avec la hauteur entraîne une augmentation de l'angle de site apparent d'une source extra-terrestre. On observe des fluctuations de part et d'autre de cet angle apparent, en raison des variations locales de la structure de l'indice de réfraction. La courbure des rayons due à la réfraction ne dépend pratiquement pas de la fréquence.

Peu de mesures de la courbure des rayons ont été publiées. On a cependant décrit des mesures par radiodétection [Fannin et Jehn, 1976; Anderson et autres, 1960] et par radiométrie [Anway, 1961].

On observe qu'un rayon se courbe surtout 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 rapidement lorsque le satellite se déplace de l'horizon vers le zénith.

Si un tel trajet traverse l'atmosphère à des altitudes toujours supérieures à plusieurs kilomètres, comme c'est le cas si la station terminale terrienne est à haute altitude, il évite les régions denses et variables de l'atmosphère, sa courbure totale est moindre et les modèles atmosphériques susmentionnés sont toujours utilisables.

La précision requise pour pointer une antenne est d'autant plus haute que le faisceau d'antenne est plus étroit. Parfois, les modèles d'atmosphère susmentionnés ne permettent pas de déterminer la direction de pointage de l'antenne; il faut alors utiliser les valeurs de l'indice de réfraction mesurées en fonction de l'altitude.

Le Tableau I donne des valeurs moyennes de la courbure des rayons, pour des ondes se propageant à travers l'atmosphère. Elles sont égales aux erreurs commises sur l'angle de site pour un trajet Terre-espace.

TABLEAU I – *Courbure des rayons due à la réfraction atmosphérique*

| Angle de site $\theta$ | Courbure totale moyenne des rayons, $\Delta\theta$ | |
|---|---|---|
| | Air continental polaire | Air maritime tropical |
| 1° | 0,45° | 0,65° |
| 2° | 0,32° | 0,47° |
| 4° | 0,21° | 0,27° |
| 10° | 0,10° | 0,14° |
| | Variation journalière de $\Delta\theta$ | |
| 1° | 0,1° valeur quadratique moyenne | |
| 10° | 0,007° valeur quadratique moyenne | |

Comme la courbure d'un rayon sur des trajets obliques est l'intégrale des déviations qu'il subit en tous les points de l'atmosphère, on peut écrire que sa valeur angulaire est dans la relation suivante avec la valeur du coïndice de réfraction au sol:

$$\zeta = a + b N_s \tag{4}$$

où $\zeta$ est la courbure du rayon en millidegrés (mdeg).

Le Tableau II donne les coefficients de cette relation [Crane, 1976a].

TABLEAU II – *Paramètres de régression permettant d'évaluer l'angle de courbure, connaissant le coïndice à la surface*

| Angle de site (degré) | $a$ (mdeg) | $b$ (mdeg/unité $N$) | Coefficient de corrélation | Erreur quadratique moyenne (mdeg) | Ecart dans 95% des cas (mdeg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | – 1112,8 | 5,778 | 0,81 | 89,0 | 151,0 |
| 0,2 | – 889,2 | 4,951 | 0,85 | 64,0 | 119,0 |
| 0,5 | – 512,3 | 3,473 | 0,94 | 26,0 | 58,0 |
| 1,0 | – 268,3 | 2,372 | 0,97 | 12,0 | 28,0 |
| 2,0 | – 95,9 | 1,409 | 0,99 | 5,0 | 11,0 |
| 3,0 | – 41,0 | 0,985 | 0,99 | 3,1 | 6,6 |
| 5,0 | – 10,2 | 0,610 | 0,99 | 1,9 | 3,8 |
| 10,0 | – 0,3 | 0,309 | 0,99 | 0,99 | 1,8 |
| 20,0 | + 0,6 | 0,151 | 0,99 | 0,49 | 0,88 |
| 50,0 | + 0,2 | 0,046 | 0,99 | 0,15 | 0,27 |

Les fluctuations de l'indice de réfraction entraînent des variations de la position apparente d'une station spatiale observée d'une station terrienne. Les données fournies par des observations qu'on effectue d'un satellite, avec une antenne de poursuite à grande ouverture, permettent de penser que la scintillation ne risque pas d'être importante pour des ouvertures de faisceaux d'antenne supérieures à 0,3°, quel que soit l'angle de site, ou à 0,01° aux angles de site plus grands que 10°. Les fluctuations de l'angle de site sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur la correction de réfraction, que l'on peut prévoir si l'on utilise les valeurs du coïndice à la surface (voir la Fig. 2) [Crane, 1976a]. On a mis au point une méthode de calcul de la gamme des angles de site apparents au moyen de données statistiques de $N_s$ [CCIR, 1974-78].

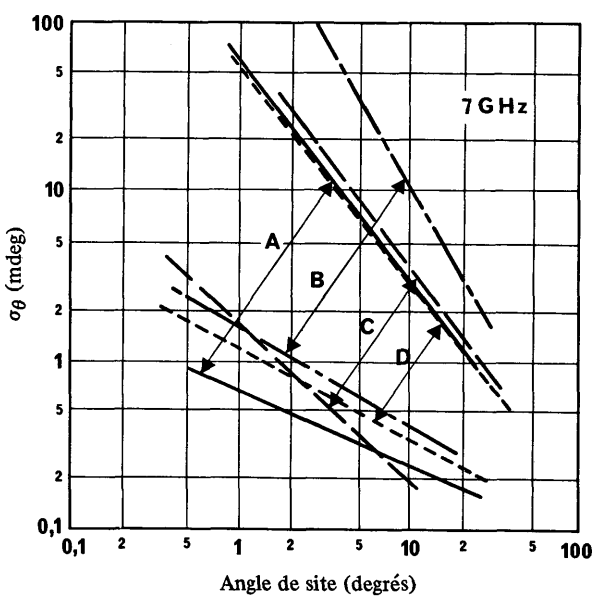



FIGURE 2 – *Ecart type de la scintillation de l'angle de site*
(diamètre de l'antenne, 37 m)

A: Printemps
B: Eté
C: Automne
D: Hiver

2.3.2 *Défocalisation*

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

## 3. Fluctuations d'amplitude

Outre la courbure des rayons due aux variations de la distribution spatiale de l'indice de réfraction, il peut se produire des fluctuations de l'amplitude d'une onde se propageant sur un trajet à visibilité directe. Compte tenu de la stratification horizontale de la troposphère, l'ampleur de ces fluctuations dépend fortement de l'angle de site du trajet. Les fluctuations de grande amplitude qui se produisent parfois sur des trajets horizontaux ou des trajets obliques de petit angle de site sont souvent appelées évanouissements atmosphériques dus à des trajets multiples. Les fluctuations plus rapides qui se produisent sur des trajets de grand angle de site et se superposent aux évanouissements plus lents dus à des trajets multiples (de petit angle de site) sont appelées scintillation.

Les évanouissements atmosphériques dus à des trajets multiples résultant de la stratification troposphérique dépendent de l'heure, du jour, de la saison et du climat. Les conditions de propagation sont les plus mauvaises en présence de couches dans lesquelles l'indice de réfraction a un gradient vertical anormalement grand. Sur des trajets en climat tempéré, on observe généralement ces conditions en été, la nuit ou pendant les premières heures du jour. Les résultats de mesures effectuées sur des trajets de Terre et des trajets Terre-espace sont exposés respectivement dans les Rapports 338-3 et 564-1.

La scintillation de l'amplitude peut aussi être produite par des fluctuations de la turbulence [Tatarskii, 1967]. On calcule la variance du logarithme de l'amplitude du signal reçu au moyen de la formule:

$$\sigma_\chi^2 = 42{,}25 \frac{(2\pi)^{7/6}}{\lambda} \int C_n^2 (\rho)\, \rho^{5/6}\, d\rho \qquad (5)$$

où $\sigma_\chi$: variance du logarithme de la puissance

$\lambda$: longueur d'onde

$C_n^2$: fonction de structure de l'indice de réfraction (voir le Rapport 563-1)

et $\rho$: distance le long du trajet.

Les scintillations de phase et d'amplitude ont été calculées par la théorie, à partir de valeurs mesurées des fluctuations de l'indice de réfraction [Yokoi et autres, 1970; Lane, 1968].

Par ailleurs, on a effectué au Japon [Yokoi et autres, 1970] des études théoriques et expérimentales sur la scintillation troposphérique. Les études théoriques, basées sur des mesures à 4 et 6 GHz, indiquent que, entre 2 et 10 GHz, la scintillation ne varie pas sensiblement en fonction de la fréquence. La Fig. 3 illustre l'écart type des scintillations dans des conditions atmosphériques normales pour une source ponctuelle, en fonction de l'angle de site, le diamètre de l'ouverture de l'antenne étant pris comme paramètre, pour des fréquences situées dans la gamme de 4 à 6 GHz.

La Fig. 4 [Crane, 1976b] donne les résultats d'observations des fluctuations de l'amplitude et de l'angle d'arrivée, faites à 7,3 GHz avec une antenne de 37 m.

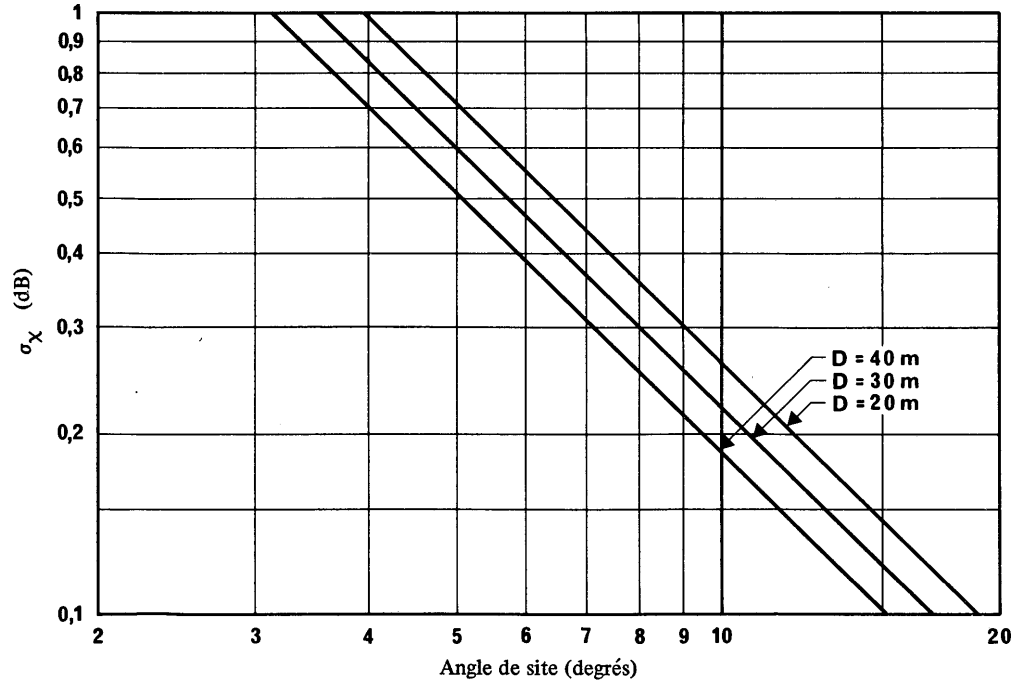



FIGURE 3 – *Ecart type de la scintillation de l'amplitude* (diamètre de l'antenne, *D*)

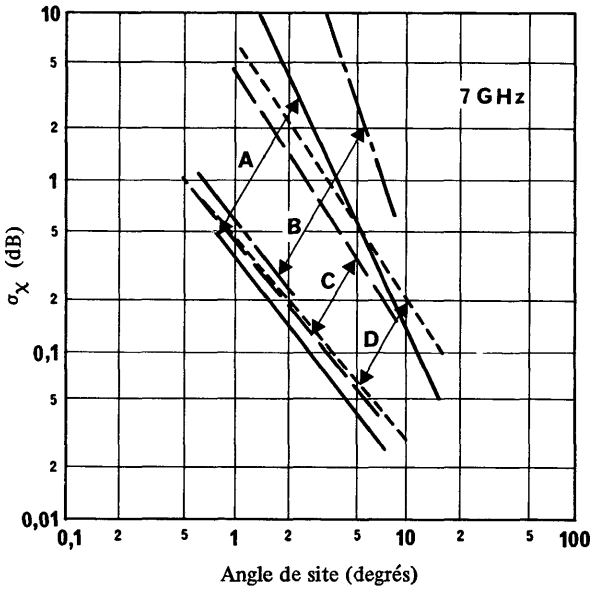



FIGURE 4 – *Ecart type de la scintillation de l'amplitude*
(diamètre de l'antenne, 37 m)

A: Printemps
B: Eté
C: Automne
D: Hiver

## 4. Déphasage et variation du déphasage

Etant donné que la troposphère a une structure de réfraction qui varie en fonction du temps, une onde qui se propage le long d'un trajet à visibilité directe subit un écart de temps de propagation, qui varie avec le temps, par rapport au temps de propagation en espace libre. Ces variations sont aléatoires et minimes sur une période de quelques minutes ou de quelques heures; sur une période plus longue, elles deviennent bien plus grandes et plus régulières, du fait des variations journalières et saisonnières du coïndice de réfraction [Bean et Dutton, 1966].

Plusieurs méthodes permettent d'évaluer les erreurs moyennes de distance ou de temps de propagation sur un trajet oblique dans la troposphère ou au-delà [Bean et Dutton, 1966]. Il existe aussi une méthode qui permet de calculer la variance du temps de propagation sur un trajet Terre-espace, d'après la variance mensuelle du coïndice de réfraction au sol et d'après des évaluations semi-empiriques des fluctuations spectrales du temps de propagation [Nuspl et autres, 1975]. On trouvera dans le Rapport 564-1 une étude de certaines des conséquences de ces résultats.

## 5. Propagation par diffusion troposphérique

Ce mode de propagation transhorizon est influencé par les petites fluctuations de l'indice de réfraction.

### 5.1 *Corrélation avec $\Delta N$*

Dans un certain nombre de cas, on a établi théoriquement et vérifié expérimentalement qu'il existe une corrélation entre les variations du champ observées sur des trajets au-delà de l'horizon et la quantité $\Delta N$, différence entre les valeurs du coïndice de réfraction à un kilomètre de hauteur et au sol. Cette corrélation n'a pu être clairement mise en évidence que dans les pays tempérés lorsque la comparaison se fait sur la base des médianes mensuelles ou tout au moins hebdomadaires [Troitsky, 1958].

### 5.2 *Corrélation avec le gradient de l'indice de réfraction à la base du volume commun*

On a essayé d'améliorer la corrélation en tenant compte des conditions de l'atmosphère au voisinage du volume commun. On a étudié [Bolgiano, 1960; Misme, 1958 et 1961; Fukushima, 1967] l'influence de la stabilité et des mouvements de l'air. Cependant, ces paramètres ne semblent pas jouer des rôles comparables sous tous les climats. Sur certaines liaisons en ondes décimétriques, on a constaté une corrélation entre l'épaisseur de la couche, entre 500 et 1000 mb, et les variations du champ. Il est cependant probable que cette corrélation n'existe pas dans le monde entier: d'ailleurs, elle ne s'applique ni aux fréquences très inférieures à 1 GHz, ni aux trajets beaucoup plus courts que 300 km.

La prise en compte du gradient de l'indice de réfraction à la base du volume commun améliore la corrélation. On a montré qu'un paramètre de la forme $T = a\,G_e + b\,G_c$ est représentatif de la moyenne mensuelle de l'affaiblissement de propagation pour des distances et des climats très différents [Battesti et autres, 1968]. L'expérience a conduit à donner aux coefficients $a$ et $b$ les valeurs respectives de $-3/8$ 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 sa 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 sa valeur à cette base. La hauteur du volume commun se calcule à partir de $G_e$.

$T$ est alors exprimé en dB par rapport à un zéro arbitraire. Le paramètre $T$ peut donc servir à calculer l'affaiblissement de propagation dans n'importe quel climat. La formule correspondante et les vérifications expérimentales qui en ont été faites sont données dans le Rapport 238-3.

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 [Misme et autres, 1960] et prendre pour valeur approchée du gradient $G_e$ équivalent le gradient $G_0$, soit dix fois la différence entre les valeurs de $N$ à 100 m de hauteur et au sol. On trouvera dans la référence [Misme et autres, 1960] 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 du champ qui sont dépassées pendant 90% et 98% de chaque mois.

En combinant ces distributions et en utilisant les méthodes décrites en [Misme et autres, 1960] pour obtenir les médianes de $G_0$ et le coïndice de réfraction au sol, $N_s$, on peut estimer $G_0$ et $N_s$ pour tous les pourcentages d'une année et obtenir ensuite la valeur approchée du gradient dans le volume commun $G_c$ au moyen de la formule semi-empirique:

$$G_c \begin{cases} \frac{1}{3}\left[200 - N_s - \frac{2}{3} G_0\right] & \text{si} \quad 1 < D_s\,\theta < 2{,}7 \\ \frac{3}{7}\left[200 - N_s - \frac{2}{3} G_0\right] & \text{si} \quad D_s\,\theta \geqslant 2{,}7 \end{cases} \tag{6}$$

où $D_s$ est la distance (km) entre horizons radioélectriques dans des conditions atmosphériques médianes;

$\theta$ est la distance angulaire (rad).

Généralement, les valeurs de $N_s$ dépassées pendant 90% et 99% du temps sont respectivement inférieures de 10 et 20 unités $N$ environ aux médianes à long terme que l'on obtient par les méthodes décrites dans le Rapport 563-1 ou en [Boithias et Battesti, 1967].

### 5.3 *Corrélation avec l'indice de réfraction à la surface de la Terre*

A partir des données météorologiques statistiques existantes, il est plus facile de déterminer la valeur de l'indice de réfraction au sol que celle du gradient de cet indice; pour déterminer le gradient, il faut disposer de mesures par radiosondes qui, en général, se font 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 au sol, pour des distances très supérieures à celle de l'horizon.

On a constaté qu'il existe une corrélation entre l'affaiblissement de transmission observé et les valeurs de l'indice de réfraction au sol [Pickard et Stetson, 1947; Bean et Dutton, 1966]; cependant, cela ne se produit, semble-t-il, que s'il existe une bonne corrélation entre le gradient vertical de l'indice de réfraction (par exemple, $\Delta N$) et la valeur de cet indice au sol [Lane, 1961]. Dans les climats tempérés, on a constaté que le mois correspondant à l'affaiblissement de transmission maximal est aussi celui qui correspond aux minimums de $N_s$, ce symbole désignant la valeur de $N$ au niveau du sol.

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

Dans d'autres climats, les données de corrélation dont on dispose ne permettent pas de conclure. Certaines mesures ont fait apparaître une bonne corrélation [Gray, 1959]; d'autres mesures révèlent une mauvaise corrélation [Boithias et Misme, 1964]. Dans ce dernier cas, la corrélation semble satisfaisante sauf pendant la période de l'année où $N_s$ dépasse 350 environ. Toutefois, l'application de cette valeur en tant que critère mondial doit se faire avec prudence. Il semble que l'absence de corrélation observée dans d'autres régions du monde ait une cause trop complexe pour qu'on puisse représenter celle-ci par un paramètre aussi simple que $N_s$; elle est probablement due aux caractéristiques verticales des masses d'air (par exemple, la subsidence).

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

A titre indicatif, si $\Delta A$ représente 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 $\Delta N$ en unités $N$ et que $\alpha_1$ et $\alpha_2$ sont des coefficients de proportionnalité dans les unités correspondantes, on peut souvent écrire, dans la limite des réserves précédentes:

$$\Delta A = \alpha_1 \Delta(N_s) \text{ et } \Delta A = \alpha_2 \Delta(\Delta N) \tag{7}$$

On a trouvé expérimentalement que:

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

= 0,6 en France et en République fédérale d'Allemagne.

Le Doc. [CCIR, 1965] montre que $\alpha_1$ 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 pas observé de proportionnalité entre $\Delta A$ et $\Delta(\Delta N)$,

$\alpha_2$ n'a été mesuré ni en République fédérale d'Allemagne ni en U.R.S.S.

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

Pour les autres pays, on ne possède pas de valeurs de $\alpha_1$ et $\alpha_2$.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ANDERSON, W. L., BEYERS, N. J. et RAINEY, R. J. [1960] Comparison of experimental and computed refraction. *IRE Trans.*, AP-8, 456-461.

ANWAY, A. C. [juin 1961] Empirical determination of total atmospheric refraction at centimeter wavelengths by radiometric means. Collins Research Report No. CRR-2425, Collins Radio Company, Cedar Rapids, Iowa.

BATTESTI J., BOITHIAS, L. et MISME, P. [mai-juin 1968] Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques (Calculations of attenuation in trans-horizon propagation from radio-meteorological parameters). *Ann. des télécomm.*

BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radiometeorology.* Dover, New York, Etats-Unis d'Amérique.

BELL, J. [1967] Propagation measurements at 3, 6 and 11 GHz over a line-of-sight radio path. *Proc. IEE*, 114, 5, 545.

BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1967] Nouvelles expérimentations sur la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Ann. des télécomm.*

BOITHIAS, L. et MISME, P. [novembre-décembre 1964] Limitations on the application of the refractive index at the surface of the earth. *Ann. des télécomm.*, Vol. 19.

BOLGIANO, R. [mai-juin 1960] A theory of wavelength dependence in ultra high frequency transhorizon propagation based on meteorological considerations. *NBS Journ. of Research*, partie D, 3.

CRANE, R. K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimetre and millimetre wavelength bands. *Proc. IEEE*, 59, 173-183.

CRANE, R. K. [1976a] Refraction effects in the neutral atmosphere, *Methods of experimental physics*, Vol. 12, Astrophysics Part B. *Radio Telescopes*, Academic Press, New York.

CRANE, R. K. [1976b] Low elevation angle measurement limitations imposed by the tropospher: An analysis of scintillation observations mode at Haystock and Millstone. MIT Lincoln Lab. Tech. Repr. 518, Lexington, Mass.

FANNIN, B. M. et JEHN, K. H. [1957] A study of radar elevation-angle errors due to atmospheric refraction. *IRE Trans.*, AP-5, 71.

FUKUSHIMA, M. [août 1967] Some investigations of the effect of mountain wave on the distribution of the atmospheric refractive index. *Journ. of the Meteorol. Soc. of Japan*, série II, 45.

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

IKEGAMI, F., AKIYAMA, T., AOYAGI, S. et YOSHIDA, H. [mars 1968] Variation of radio refraction in the lower atmosphere. *IEEE Trans.*, Vol. AP-16, 3.

LANE, J. A. [1961] The radio refractive index gradient over the British Isles. *Journ. Atmos. Terr. Phys.*, 21.

LANE, J. A. [1968] Scintillation and absorption fading on line-of-sight links at 35 and 100 GHz. *IEE Conf. Publ.*, N° 48, Tropospheric wave propagation, Londres.

MISME, P. [1958] Corrélation entre le champ à grande distance et un nouveau paramètre radiométéorologique. *Transactions of PG AP*, AP-6, 3.

MISME, P., BEAN, B. R. et THAYER, G. D. [août 1960] Models of the atmospheric radio refractive index. *Proc. IRE*, 48, 8, 1499-1501.

NUSPL, P. P., DAVIES, N. G. et OLSEN, R. L. [novembre 1975] Ranging and synchronization accuracies in a regional TDMA experiment. Proceedings of the Third International Digital Satellite Communications Conference Kyoto, Japon.

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

TATARSKII [1967] *The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation.* Naouka, Moscou.

TROITSKY, N. V. [1958] Fading of ultra-short waves in radio-relay systems (en russe), *Elektrosviaz*, 10.

YOKOI, H., YAMADA, M. et SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. *Astronomical Society*, Japon, Vol. 22, 4, 511-524.

*Documents du CCIR*

[1965]: V/45 (U.R.S.S.);

[1974-78]: 5/24 (Canada).

RAPPORT 719 *

# AFFAIBLISSEMENT PAR LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

(Question 2-3/5)

(1978)

## 1. Généralités

La vapeur d'eau et l'oxygène comportent des raies d'absorption des ondes radioélectriques. Ces raies sont d'autant plus larges que la pression atmosphérique est haute.

On a l'habitude de rapporter l'affaiblissement linéique (dB/km) à la pression moyenne au niveau de la mer (1 atmosphère = 1013,6 mb), à une valeur normale de la teneur en humidité, par exemple, 7,5 g/m$^3$, et à une température de 20 °C. La Fig. 1, qui a été établie sur la base d'un grand nombre de résultats expérimentaux, donne un aperçu général de cette absorption entre 1 et 350 GHz [CCIR, 1974-78].

Une teneur en humidité de 7,5 g/m$^3$ ne peut se manifester au-dessous de 6 °C, température de saturation de l'air. Mais à des températures supérieures à 8 °C, dans certains climats, cette teneur peut apparaître pendant 50% du temps (voir le Rapport 563-1).

L'absorption gazeuse totale $A_a$ (dB) dans l'atmosphère, pour un trajet de longueur $r_0$ (km), peut s'exprimer par la formule:

$$A_a = \int_0^{r_0} \left\{ \gamma_o(r) + \gamma_w(r) \right\} dr \qquad \text{dB} \tag{1}$$

où $\gamma_o$ et $\gamma_w$ représentent les affaiblissements linéiques par absorption (dB/km), respectivement pour l'oxygène et pour la vapeur d'eau.

## 2. Trajets légèrement inclinés, proches du sol

Dans le cas d'un trajet de Terre, ou légèrement incliné, proche du sol, la formule (1) peut s'écrire:

$$A_a = \left( \gamma_{o0} + \frac{\rho}{7{,}5} \gamma_{w0} \right) r_0 \qquad \text{dB} \tag{2}$$

où les valeurs $\gamma_{o0}$ et $\gamma_{w0}$ sont tirées de la Fig. 1 et $\rho$ est la teneur en vapeur d'eau. Les variations de pression et de température ont une influence pratiquement nulle sur l'absorption gazeuse le long d'un trajet qui traverse l'atmosphère en restant près du sol. En revanche, pour un trajet très long passant au-dessus de plusieurs types de terrain et de plan d'eau (mers ou lacs), il faut parfois tenir compte des variations d'humidité.

## 3. Trajets inclinés et trajets Terre-espace

Dans le cas d'un trajet incliné ou d'un trajet Terre-espace, la formule (1) peut s'écrire:

$$A_a = \gamma_{o0}\, r_{eo} + \gamma_{w0}\, r_{ew} \qquad \text{dB} \tag{3}$$

où $\gamma_{o0}$ et $\gamma_{w0}$ sont les affaiblissements linéiques dus à l'absorption respectivement par l'oxygène et par 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 hauteur 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 correspondant à la traversée d'une couche d'atmosphère uniforme d'environ 2 km d'épaisseur. Il se peut toutefois que ces approximations ne soient pas valides pour les pays à climat tropical.

La Fig. 2 représente l'affaiblissement estimé sur un trajet zénithal dans un seul sens, à une fréquence comprise entre 1 et 300 GHz, à travers une atmosphère modérément humide à stratification sphérique (7,5 g/m$^3$ au sol) [Crane, 1971; Waters, 1976]. On y a indiqué également l'affaiblissement dans le cas d'une atmosphère sèche. Pour des valeurs arbitraires des angles de site initiaux, $5° \leqslant \theta \leqslant 90°$, on peut obtenir en première approximation l'affaiblissement (dB) à partir des valeurs correspondant à des trajets verticaux, en les multipliant par cosec $\theta$ [Dutton et Dougherty, 1973]. On admet qu'aucun nuage formé de gouttes d'eau condensée ni qu'aucune pluie ne se trouve sur le trajet. On peut utiliser une interpolation linéaire entre les courbes correspondant à 7,5 g/m$^3$ et 0 g/m$^3$ et une extrapolation linéaire jusqu'à 15 g/m$^3$ au moins, c'est-à-dire multiplier la valeur en dB par $\rho/7{,}5$, $\rho$ étant la teneur en vapeur d'eau (g/m$^3$). Toutefois, ces courbes ne tiennent pas compte d'un affaiblissement supplémentaire qui peut être dû à la présence de molécules d'eau complexes, en particulier si l'humidité relative est forte, car ces effets semblent très variables et complexes et sont encore mal connus [Gibbins et autres, 1975; Emery et autres, 1975]. En pratique, ces effets supplémentaires sont négligeables aux fréquences inférieures à 100 GHz environ.

---

* Ce Rapport doit être porté à la connaissance des Commissions d'études 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

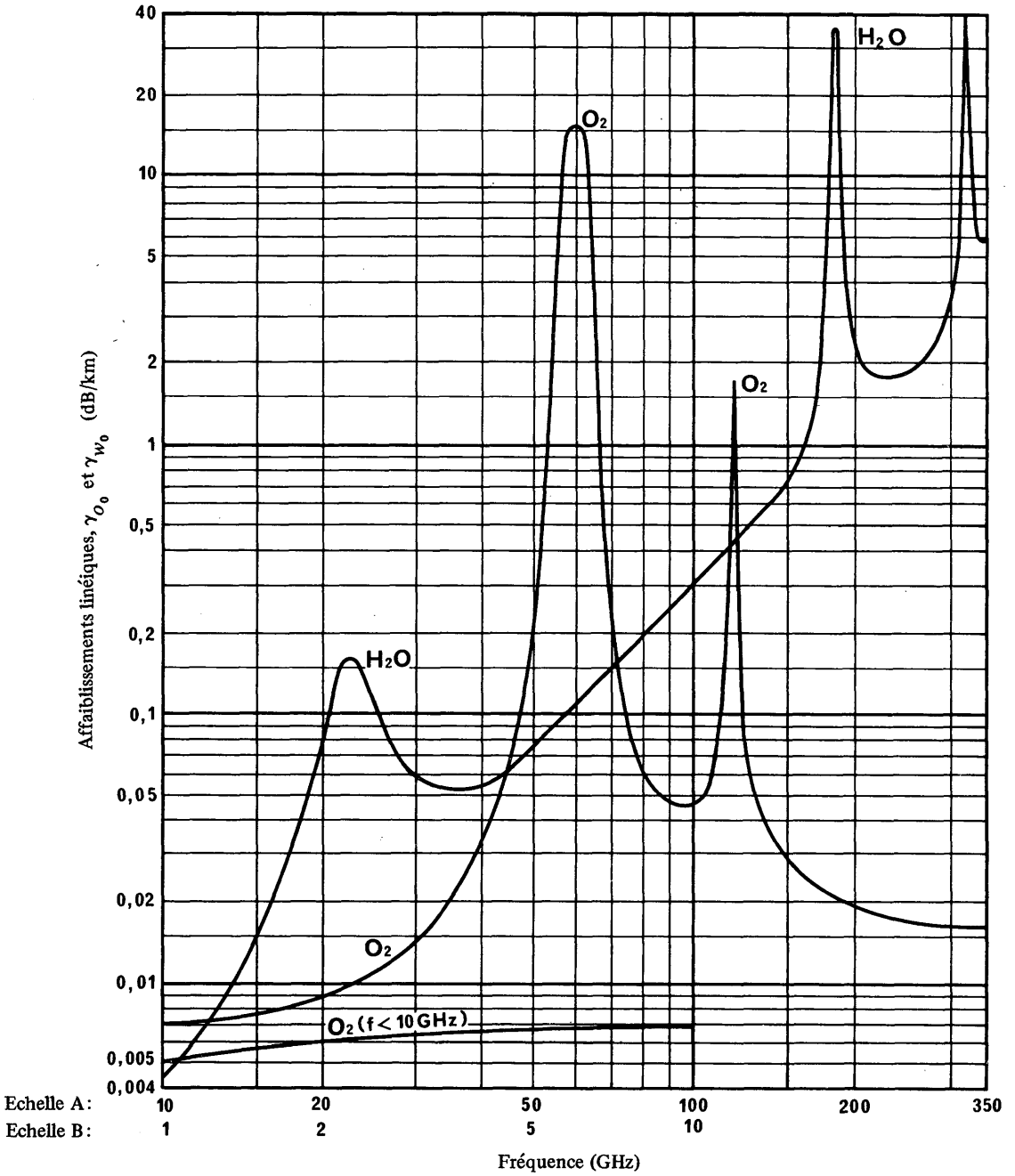



FIGURE 1 – *Affaiblissement linéique par les gaz de l'atmosphère*
(L'échelle B est relative à l'absorption par l'oxygène au-dessous de 10 GHz)

Pression : 1 at (= 1013,6 mb)
Température : 20°C
Teneur en vapeur d'eau : 7,5 g/m³

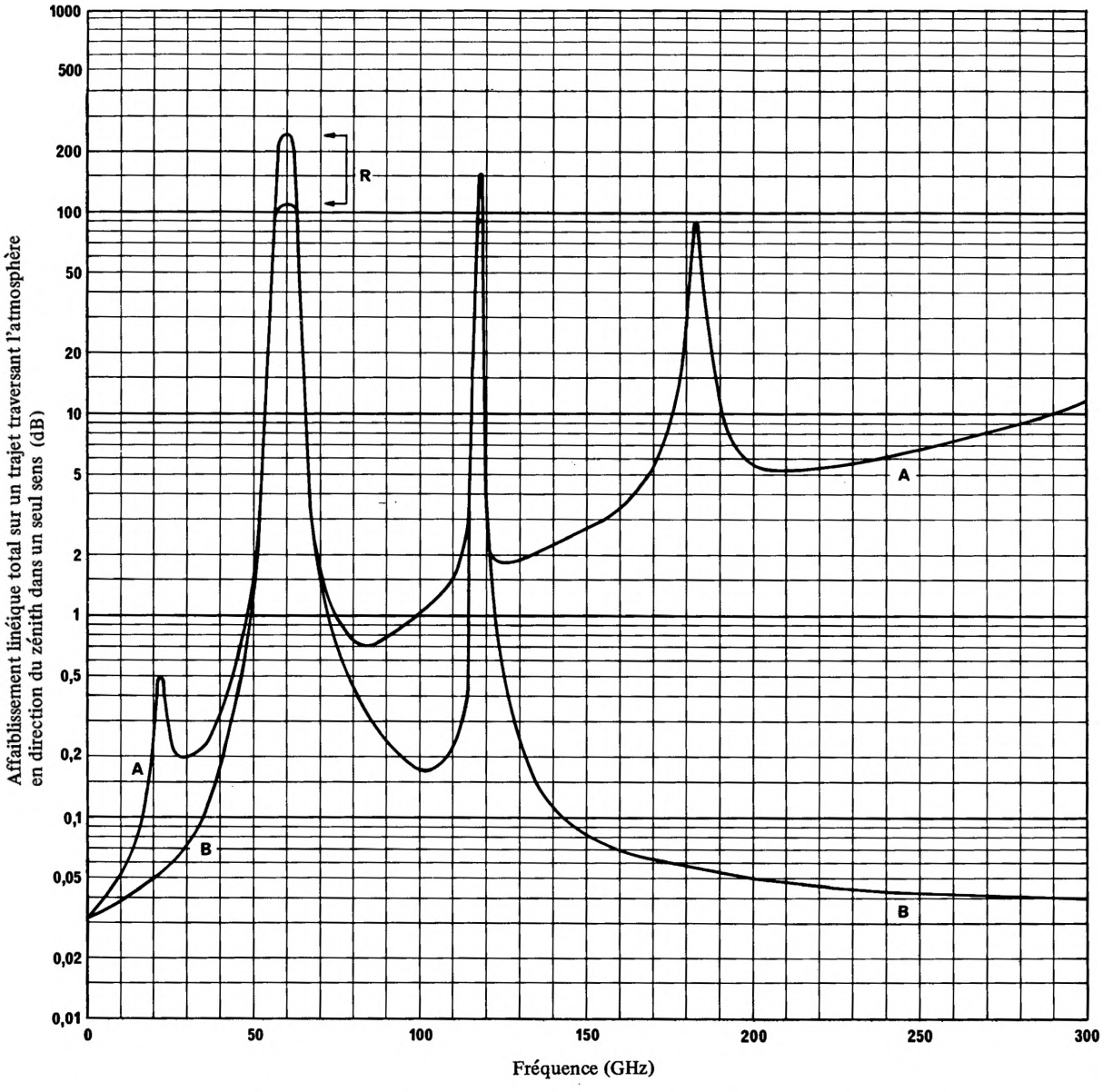



FIGURE 2 – *Affaiblissement linéique total sur un trajet traversant l'atmosphère en direction du zénith, dans un seul sens, en fonction de la fréquence*

A : 7,5 g/m$^3$ au sol

B : atmosphère sèche (0 g/m$^3$)

R : intervalle de variation dans la structure fine de la bande des 60 GHz

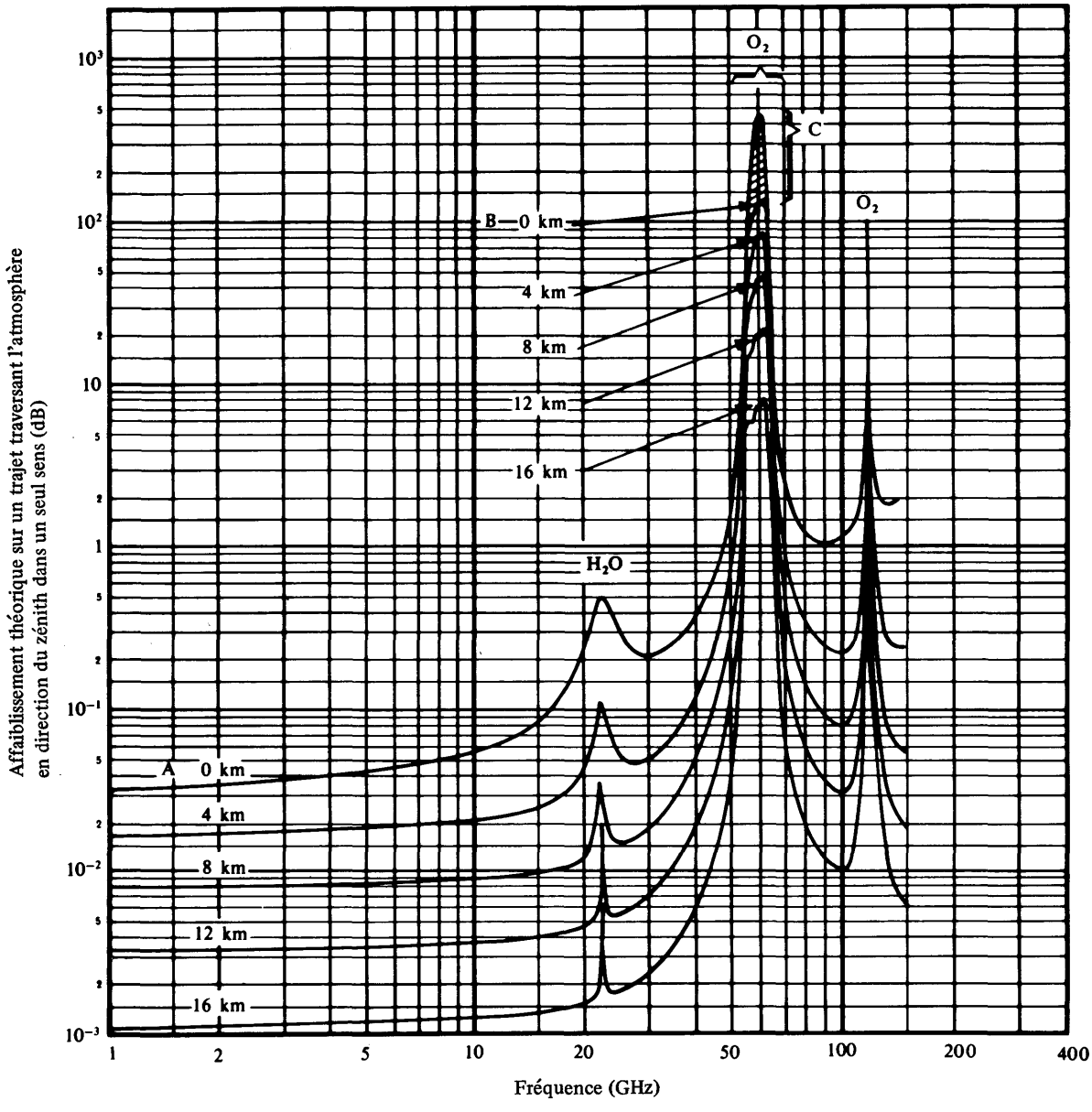



FIGURE 3 – *Affaiblissement théorique sur un trajet vertical, dans un seul sens, à partir des hauteurs indiquées, jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère, pour une atmosphère modérément humide (7,5 g/m³ au sol)*

A: Altitudes de départ (km)

B: Valeurs minimales pour des trajets partant de la hauteur indiquée (km)

C: Domaine de variation pour des trajets allant du sol à 80 km d'altitude (structure fine de la bande des 60 GHz, absorption par l'oxygène)

La Fig. 3 représente l'affaiblissement théorique (dans un seul sens) sur des trajets verticaux allant des hauteurs indiquées jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère, à une fréquence comprise entre 1 GHz et 150 GHz et pour une atmosphère modérément humide.

A des fréquences voisines du maximum de l'affaiblissement linéique, étalé de part et d'autre de 60 GHz, dû à l'absorption par l'oxygène, le brouillage entre stations au sol est réduit à un minimum en raison des affaiblissements importants sol-sol qui se déduisent de la Fig. 1. Ces fréquences peuvent être utiles pour les transmissions de satellite à satellite, mais les brouillages mutuels avec les stations au sol se trouvent réduits en raison de la forte absorption indiquée par la Fig. 2. Dans les régions où se font les transmissions entre des aéronefs volant à haute altitude et les satellites, la bande des 60 GHz où se produit l'absorption par l'oxygène se réduit à une série de minces raies d'absorption, séparées par des bandes dans lesquelles l'affaiblissement est relativement minime. L'intervalle de variation de l'affaiblissement dans cette structure fine de la bande est indiqué à la Fig. 3. Les valeurs minimales sur ces trajets zénithaux représentent l'affaiblissement à prévoir dans les creux entre les raies d'absorption. Les caractéristiques d'affaiblissement et de dispersion dans la structure fine de la bande des 60 GHz sont données en détail dans [Liebe, 1975a et 1975b].

## 4. Affaiblissement atmosphérique et utilisation du spectre

### 4.1 *Application aux télécommunications*

A titre d'indication générale des possibilités d'utilisation des longueurs d'onde de quelques millimètres et moins pour les télécommunications, la Fig. 4 montre les valeurs de l'affaiblissement linéique (dB/km) pour un trajet situé près du sol, en fonction de la fréquence. On y a aussi indiqué, aux fins de comparaison, l'affaiblissement linéique dans le brouillard et dans la pluie, pour trois valeurs du taux de précipitation [Zufferey, 1972] (voir le Rapport 721). Il convient de préciser que cette figure ne donne que des ordres de grandeur.

### 4.2 *Application à la télédétection*

La variation de l'affaiblissement zénithal total en fonction de la fréquence, à partir des couches supérieures de l'atmosphère jusqu'à une altitude donnée, comme le montre la Fig. 3, permet de détecter à distance la variation de la température de l'atmosphère en fonction de l'altitude. La température de bruit équivalente (voir le Rapport 720) dépend de la température du milieu et de la vitesse de variation de l'affaiblissement zénithal total en fonction de l'altitude (qui est la fonction de pondération de la température, $d(e^{-23A_a})/dh$). La Fig. 5 représente les fonctions de pondération pour différentes fréquences, dans le cas de l'absorption par l'oxygène.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CRANE, R. K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimetre and millimetre wavelength bands. *Proc. IEEE*, **59**, 173-188.

DUTTON, E. J. et DOUGHERTY, H. T. [1973] Modelling the effects of clouds and rain upon satellite-to-ground system performance. Office of Telecommunications Report COM-75-10950/AS, NTIS, Springfield, Va, Etats-Unis d'Amérique.

EMERY, R. J., MOFFAT, P., BOHLANDER, R. A. et GEBBIE, H. A. [1975] *Journ. Atmos. Terr. Phys.*, 37, 587.

GIBBINS, C. J., GORDON-SMITH, A. C. et CROOM, D. L. [1975] *Planet. Space Sci.*, 23, 61.

LIEBE, H. J. [avril 1975] Molecular Transfer Characteristics of Air between 40 and 140 GHz. *Trans. IEEE*, MTT-23, 4, 380-386.

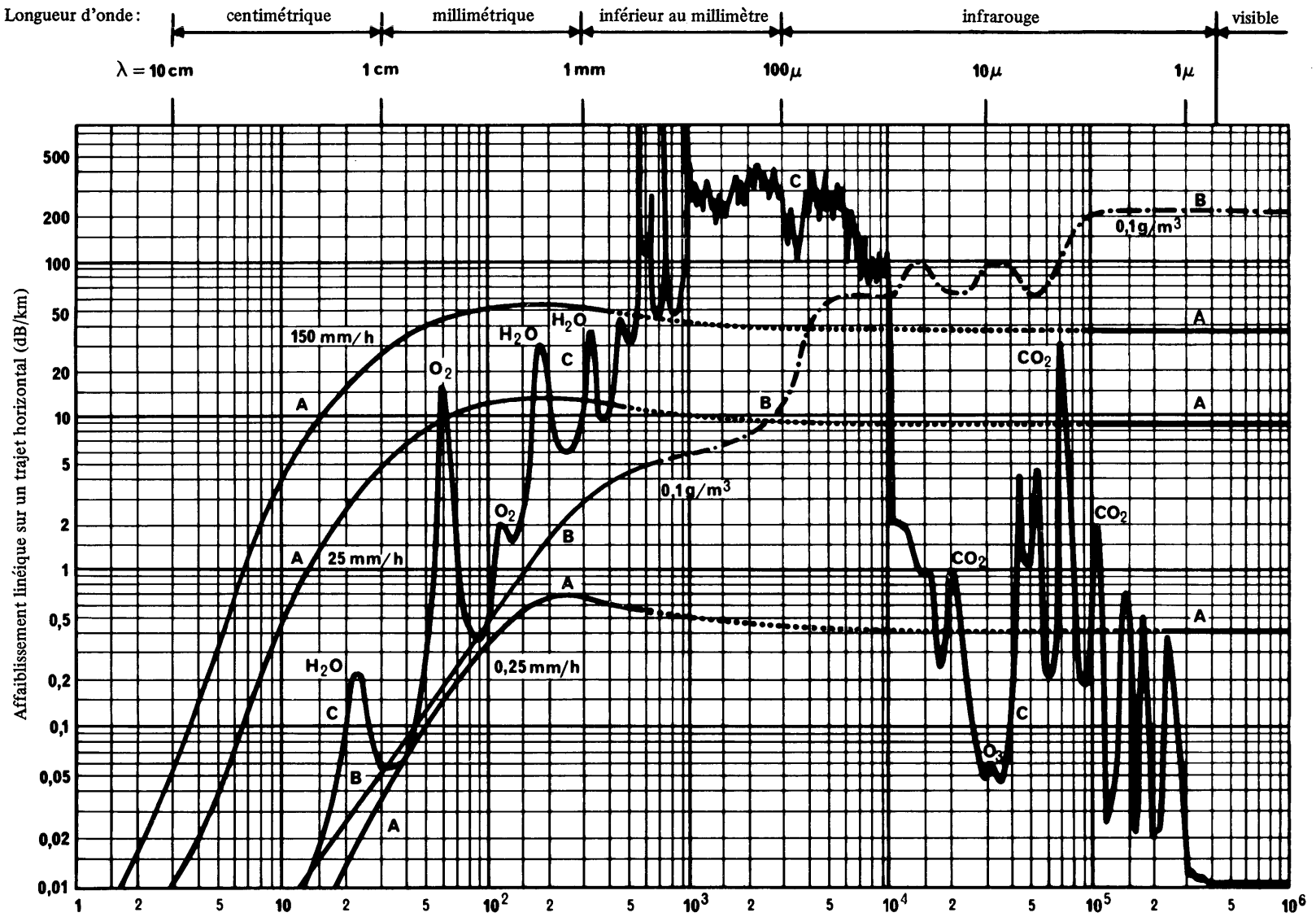
LIEBE, H. J. [1975] Studies of Oxygen and Water Vapor Microwave Spectra under Simulated Atmospheric Conditions. Rapport 75-65 de l'Office des Télécommunications, Boulder, Colorado.

WATERS, I. W. [1976] Absorption and emission by atmospheric gases. *Methods of experimental physics.* Vol. 12B, *Radio telescopes*, Academic Press, New York, NY, 142-146.

ZUFFEREY, C. H. [1972] A study of rain effects on electromagnetic waves in the 1-600 GHz range. M. Sci. Thesis, Dept. of Elec. Eng., University of Colorado, Boulder, Etats-Unis d'Amérique.

*Document du CCIR,*

[1974-78]: 5/68 (France).




Température : 20° C
Pression au niveau de la mer : 1 at.
Teneur en vapeur d'eau : 7,5 g/m³

A : Pluie
B : Brouillard
C : Gaz de l'atmosphère

FIGURE 4 – *Affaiblissement dû aux composants gazeux et aux précipitations de l'atmosphère dans le cas de transmissions à travers ce milieu*

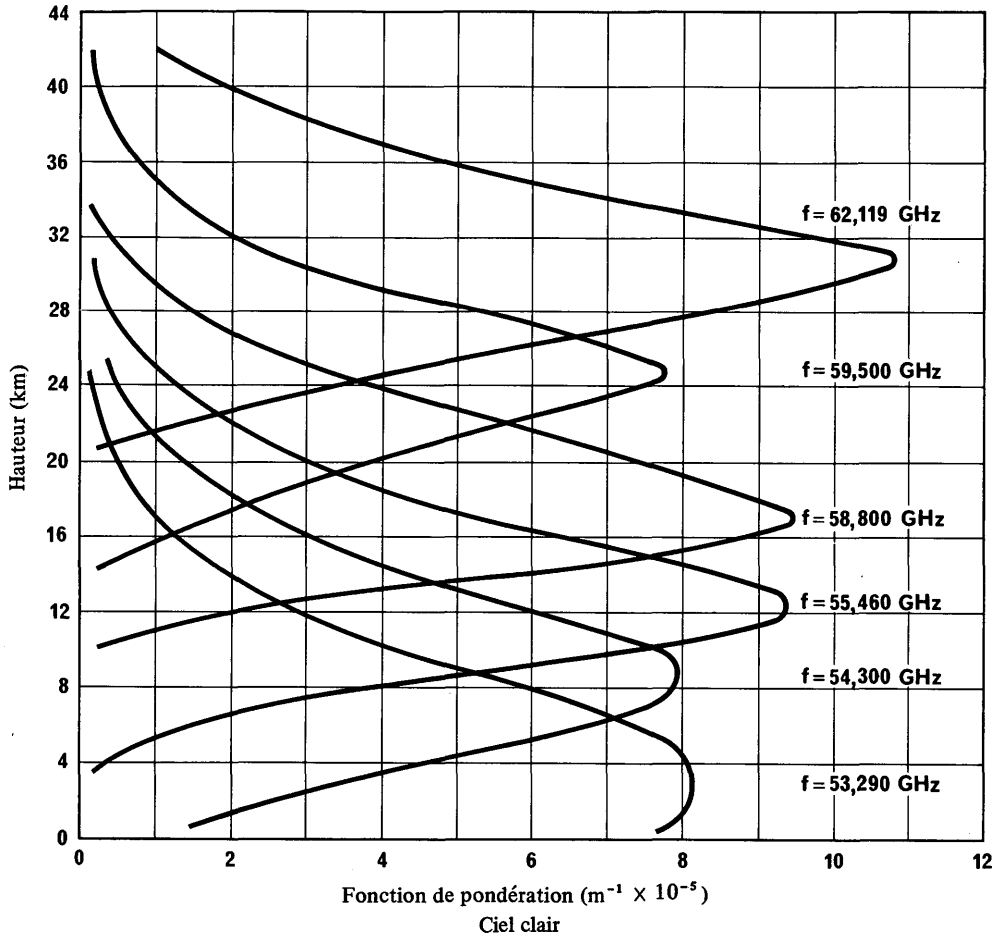



FIGURE 5 – *Fonctions de pondération de la température, la variable étant l'altitude ($\theta = 40°$; polarisation à 90°) et le paramètre la fréquence, f*

---

RAPPORT 720 *

## ÉMISSION RADIOÉLECTRIQUE LIÉE A L'ABSORPTION PAR LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES ET LES PRÉCIPITATIONS

(Programme d'études 5C-3/5)

(1978)

### 1. Généralités

La région non ionisée de l'atmosphère, en tant que milieu absorbant, est également une source d'émission de bruits. La température équivalente de bruit du ciel, $T_s$, dans une direction donnée, s'exprime par la formule:

$$T_s = \int_0^\infty T(r)\,\alpha(r)\,\exp\left\{-\int_0^r \alpha(r')\,dr'\right\} dr \qquad (1)$$

où $T(r)$ et $\alpha(r)$ sont respectivement la température (K) et le coefficient d'absorption ($km^{-1}$) 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 $T_m$, la formule précédente prend la forme simplifiée:

$$T_s = T_m\left(1 - \frac{1}{L}\right) \qquad (2)$$

où $L$ est le facteur d'affaiblissement du milieu absorbant.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 2, 4, 7, 8, 10 et 11.

De plus, dans le cas d'une atmosphère stratifiée horizontalement, la température de bruit du ciel pour un angle de site $\theta$ est donnée par l'expression:

$$T_s(\theta) = T_m (1 - \beta_0^{\operatorname{cosec}\theta}) \quad (3)$$

si les angles de site sont supérieurs à 15°, $\beta_0 = 1/L_0$ se rapportant à la transmission à travers l'atmosphère dans la direction du zénith.

Quand on estime la température de bruit de l'antenne, le diagramme de rayonnement de l'antenne, le rayonnement en provenance de la surface de la Terre et le rayonnement extraterrestre doivent être pris aussi en considération.

## 2. Température de bruit du ciel due aux gaz atmosphériques

Les Fig. 1 à 3 indiquent la température globale de bruit du ciel dans les hypothèses suivantes: faisceau infiniment étroit, divers angles de site, fréquences comprises entre 1 et 100 GHz, modèle théorique, température au sol de 20 °C et teneurs en vapeur d'eau au sol de 3, 10 et 17 g/m$^3$ (respectivement, humidités relatives de 17, 58 et 98%) [CCIR, 1974-78].

Dans tous les calculs, on a pris pour modèle une amosphère à stratification horizontale et, afin de tenir compte des effets de la réfraction aux petits angles de site, on a admis un rayon terrestre équivalent de 8500 km et une pression totale de 1 at (1013,6 mb). Pour les hauteurs supérieures à 13 km, on a supposé que la variation de la température en fonction de la hauteur est celle de l'«US Standard Atmosphere» aux latitudes moyennes [*US Standard Atmosphere Supplements*]. Au-dessous de 13 km, cette variation est supposée linéaire. Pour la teneur en vapeur d'eau en fonction de la hauteur, on a admis une décroissance exponentielle sur une étendue verticale de 2 km. L'effet des changements de température dans le modèle est relativement faible. Par exemple, pour toute fréquence de 1 à 100 GHz, lorsque la température varie de ± 7 °C autour de la moyenne (20 °C), la variation maximale du bruit émis (pour une teneur en vapeur d'eau au sol constante, de 10 g/m$^3$) est de ± 3,5%.

Les Fig. 1 à 3 cadrent raisonnablement bien avec les quelques données expérimentales dont on dispose. Il convient cependant de les employer avec prudence, surtout pour les taux d'humidité relative très élevés, en attendant que l'on ait recueilli des données expérimentales plus nombreuses dans la bande des ondes millimétriques.

Une fois admise une loi de décroissance de la teneur en vapeur d'eau avec l'altitude, on peut montrer [Damosso et De Padova, 1976] que, dans la gamme de fréquences de 10 à 20 GHz, on peut évaluer la température de bruit au zénith d'après les valeurs de l'humidité au niveau du sol. Ainsi, en un lieu donné, on peut trouver la température de bruit du ciel pour plusieurs angles de site, en tenant compte des caractéristiques climatiques locales. Cette méthode est douteuse dans les zones équatoriales (voir le Rapport 563-1).

## 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 se calculer au moyen des expressions indiquées ci-dessus, à condition de connaître la température et l'affaiblissement linéique, ainsi que leurs variations le long du trajet étudié. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, la diffusion multiple peut être importante et doit donc être prise en considération.

Des travaux effectués en U.R.S.S. 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 de 90 K et 260 K.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DAMOSSO, E. D. et DE PADOVA, S. [1976] Some considerations about sky noise temperature at frequencies above 10 GHz. *Alta frequenza*, Vol. 45, 2.

*US Standard Atmosphere Supplements* [1966] Environmental Sci. Serv. Administration, Dept. of Commerce, Washington, DC.

*Document du CCIR*

[1974-78]: 5/145 (Royaume-Uni).

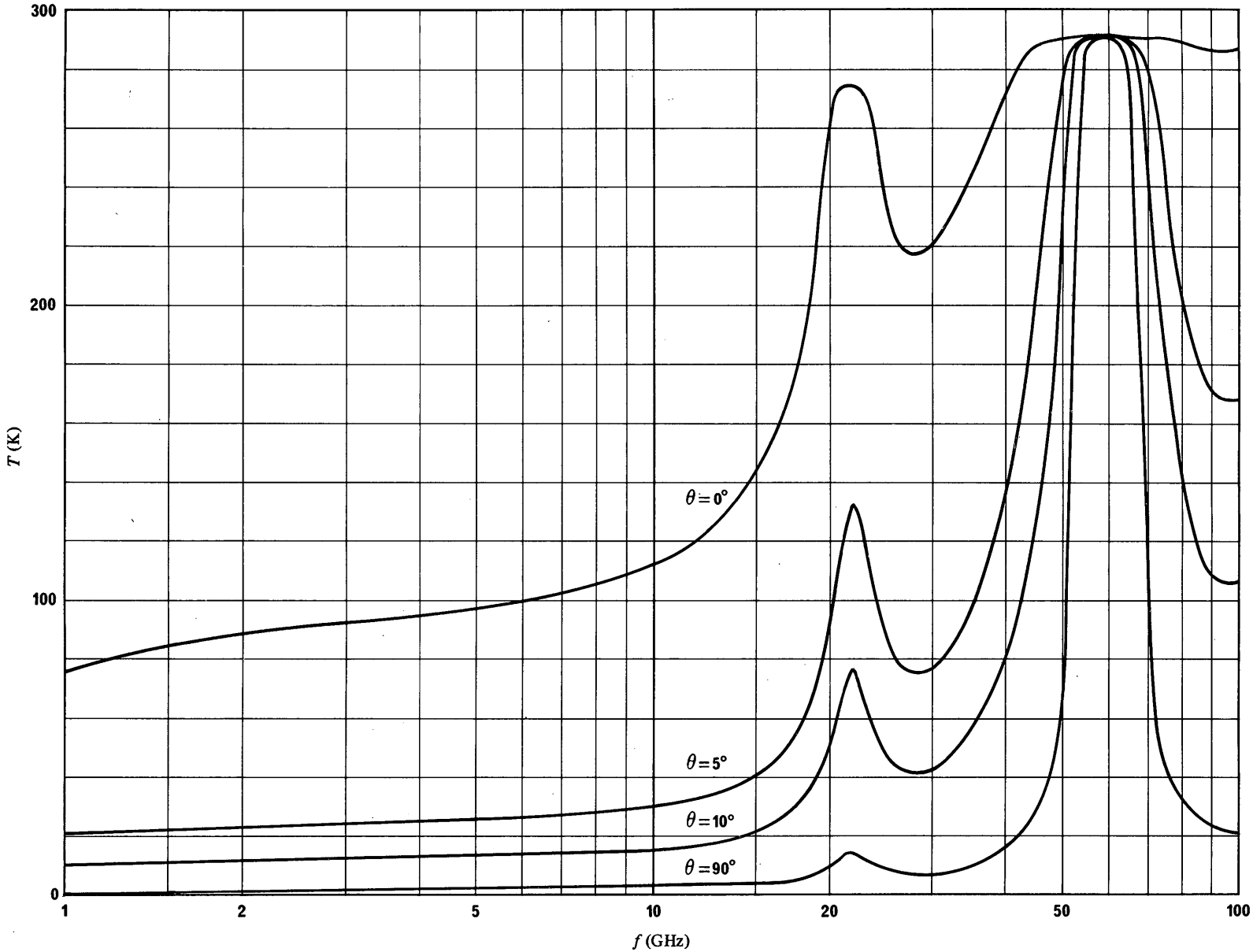



FIGURE 1 – *Température de bruit du ciel (temps clair)*

Pression au sol: 1 at.
Température au sol: 20°C
Teneur en vapeur d'eau au sol: 3 g/m³
Angle de site: $\theta$

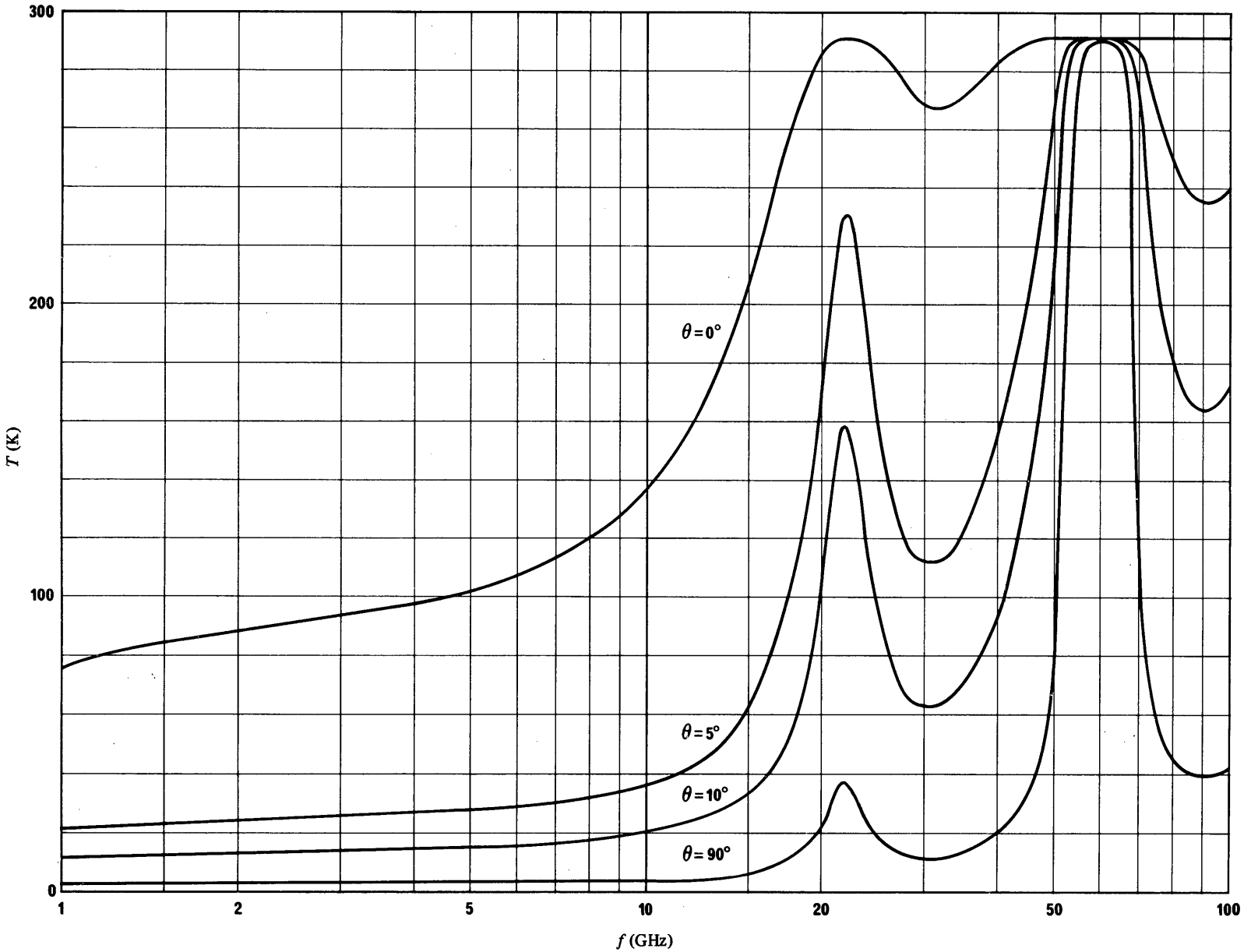



FIGURE 2 – *Température de bruit du ciel (temps clair)*

Pression au sol: 1 at.
Température au sol: 20°C
Teneur en vapeur d'eau au sol: 10 g/m³
Angle de site: $\theta$

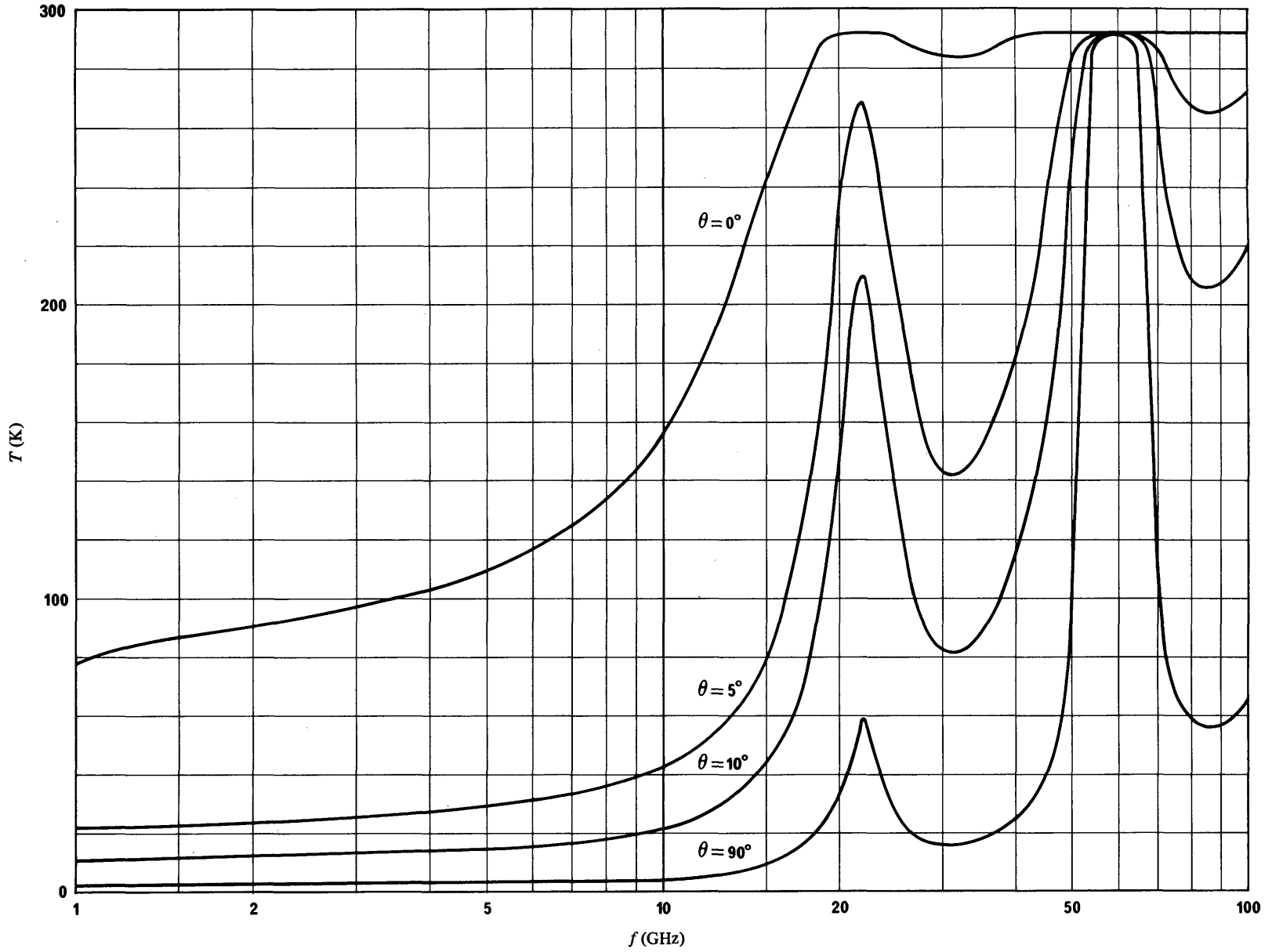



FIGURE 3 – *Température de bruit du ciel (temps clair)*

Pression au sol: 1 at.
Température au sol: 20°C
Teneur en vapeur d'eau au sol: 17 g/m³
Angle de site: $\theta$

# RAPPORT 721 *

## AFFAIBLISSEMENT ET DIFFUSION PAR LES PRÉCIPITATIONS ET AUTRES PARTICULES ATMOSPHÉRIQUES

(Question 2-3/5)

(1978)

### 1. Introduction

Les précipitations, en particulier la pluie, causent une absorption et une diffusion sur une onde radioélectrique. A leur tour, ces phénomènes ont deux effets principaux: un affaiblissement le long du trajet et une diffusion dans toutes les directions, d'où risque de brouillage dû à ce dernier effet.

Ces effets se manifestent à toutes les fréquences, mais l'affaiblissement n'a de conséquences importantes qu'aux fréquences supérieures à plusieurs gigahertz et pendant des pourcentages du temps où les précipitations sont intenses.

En ce qui concerne les particules de sable et de poussière, celles-ci semblent n'avoir qu'un effet minime, au moins jusqu'à 12 GHz. On n'a pas encore signalé que ces particules aient des effets sensibles sur la propagation.

### 2. Affaiblissement dû à la pluie

2.1 On peut évaluer approximativement l'affaiblissement dû à la pluie par la théorie classique de la diffusion de Mie. Dans l'hypothèse de gouttes sphériques, on peut rapporter l'affaiblissement linéique dû à la pluie, $\gamma_R$ (dB/km), au taux de précipitation, $R$ (mm/h), pour une fréquence donnée, si l'on connaît l'indice complexe de réfraction de l'eau à la température des gouttes de pluie, la vitesse limite et la distribution du diamètre des gouttes de pluie [Ryde et Ryde, 1945; Medhurst, 1965; Setzer, 1970].

Le comportement de l'affaiblissement linéique en fonction de la fréquence pour différentes valeurs du taux de précipitation est représenté à la Fig. 1 [Olsen et autres, 1978]. Le nomogramme de la Fig. 2 permet de déterminer l'affaiblissement linéique pour des fréquences d'au plus 40 GHz et des taux de précipitation pouvant atteindre 250 mm/h (entre 150 et 250 mm/h, cette échelle a été établie par extrapolation). Ces figures ont été établies à partir de données expérimentales relatives à la distribution de la dimension des gouttes de pluie [Laws et Parsons, 1943] et à leur vitesse limite [Gunn et Kinzer, 1949], au moyen d'un modèle empirique pour l'indice de réfraction de l'eau à 20 °C [Ray, 1972].

Pour tous les taux de précipitation, l'affaiblissement linéique augmente très rapidement jusqu'à une fréquence d'environ 100 GHz. Au-dessus de 100 GHz, l'affaiblissement linéique n'augmente pas sensiblement quand la fréquence s'élève, sauf pour les très petits taux de précipitation. Au-dessus de 200 GHz environ, selon le taux de précipitation, l'affaiblissement linéique décroît légèrement quand la fréquence s'élève, jusqu'à 1000 GHz, où la limite optique est presque atteinte. On voit donc que de courtes liaisons seraient réalisables pour des télécommunications à des fréquences supérieures à 100 GHz, sous des climats où les taux de précipitation dépassent rarement 25 mm/h [Harden et autres, 1975].

2.2 La validité des données expérimentales et des hypothèses faites pour calculer l'affaiblissement linéique dû aux précipitations a été l'objet d'une attention particulière, de même que les possibilités d'application de ces calculs à des cas réels de précipitations [Medhurst, 1965; Crane, 1971; Crane, 1975; Waldteufel, 1973; Fedi et Mandarini, 1973]. Bien que des mesures effectuées en ondes millimétriques sur des pluies naturelles [Norbury et White, 1972; Sander, 1975] et sur des pluies simulées [Crane, 1974] concordent de manière satisfaisante avec les calculs théoriques, de nombreuses mesures faites à de plus grandes longueurs d'onde s'écartent de la théorie, surtout à cause des limites imposées aux méthodes d'échantillonnage des taux de précipitation [Fedi et autres, 1974].

2.3 La distribution de la dimension des gouttes de pluie de Laws et Parsons est la plus communément utilisée pour calculer l'affaiblissement linéique. Elle repose sur des mesures qui correspondent à des taux de précipitation allant jusqu'à 50 mm/h et peut être extrapolée au-delà.

D'autres distributions de dimension moyenne des gouttes, représentées par une fonction exponentielle négative [Marshall et Palmer, 1948; Joss et autres, 1968] ont été utilisées aussi pour calculer l'affaiblissement linéique. La distribution de Joss et autres diffère des autres en ce sens qu'elle est spécifiée pour trois types de pluie: pluie d'orage (ou de convexion), pluie continue et bruine. Pour les taux de précipitation élevés, qui présentent le plus d'importance dans la conception des systèmes de télécommunication, et pour les fréquences supérieures à 10 GHz, la distribution de Laws et Parsons donne des affaiblissements linéiques plus grands que n'en donne la distribution des pluies d'orage selon Joss et autres. La différence est particulièrement marquée aux fréquences supérieures à 100 GHz. En revanche, la distribution de Joss et autres pour la bruine donne des affaiblissements linéiques plus grands pour les petits taux de précipitation et pour ces fréquences élevées [Olsen et autres, 1978]. Il convient d'appliquer avec circonspection les estimations de l'affaiblissement linéique pour des fréquences supérieures à 100 GHz, car les dispositifs utilisés pour obtenir des données sur la distribution de la dimension des gouttes de pluie tendent à sous-estimer le nombre des petites gouttes, qui contribuent justement beaucoup à l'affaiblissement à ces fréquences.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

Si la température des gouttes de pluie n'est pas la température supposée, cela n'a d'importance que pour les fréquences inférieures à 20 GHz, auquel cas l'écart d'avec les courbes des Fig. 1 et 2 peut atteindre 20%.

Les données expérimentales sur la vitesse limite des gouttes de pluie en atmosphère calme accusent généralement une bonne concordance avec celles qui ont servi d'hypothèse pour le calcul des courbes des Fig. 1 et 2.

2.4 On considère généralement que la théorie [Van de Hulst, 1957] englobe uniquement les effets de la diffusion simple, mais il faut préciser que cette théorie fait intervenir aussi les effets de la diffusion multiple vers l'avant (phénomène par lequel, sur chacun des trajets multiples du signal diffusé, il y a toujours une composante vers l'avant). Comme la population moyenne des gouttes de pluie est limitée, même dans les plus fortes pluies, c'est là le seul phénomène de diffusion multiple qui contribue sensiblement au champ moyen (ou cohérent) transmis à travers la pluie [Rogers et Olsen, 1976].

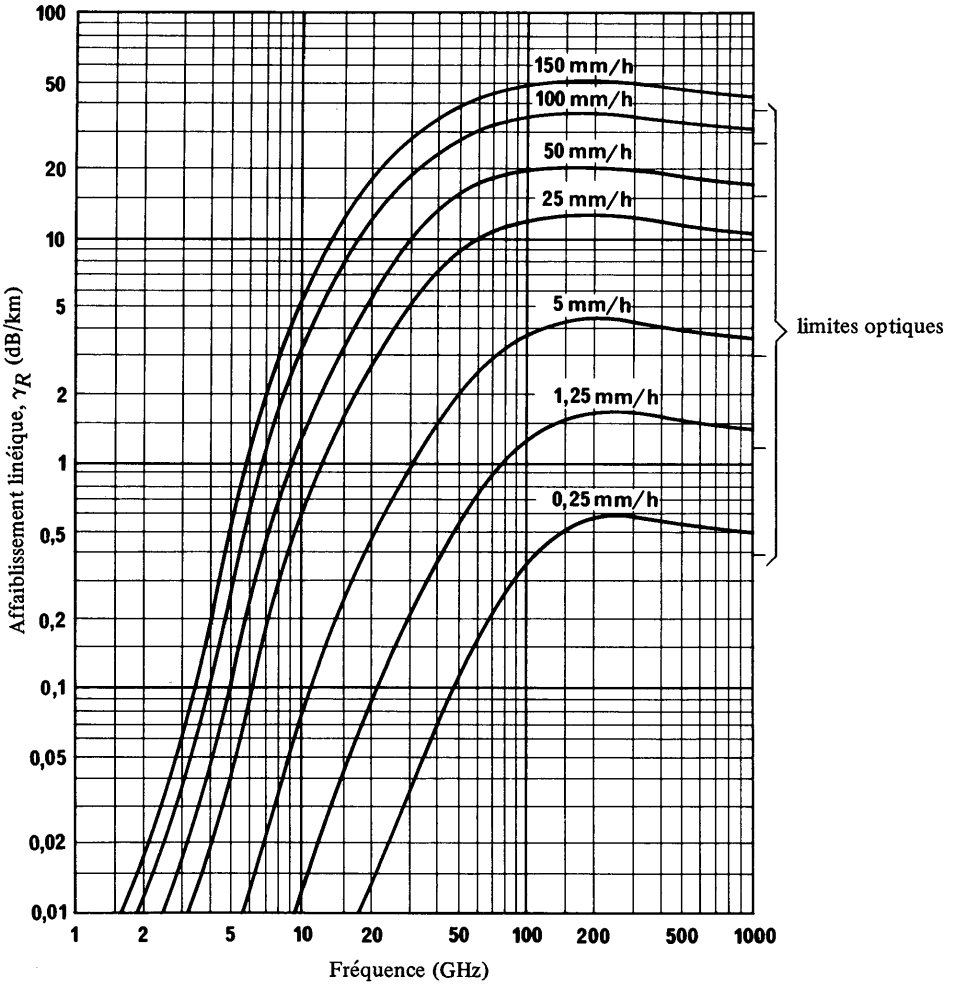



FIGURE 1 – *Affaiblissement linéique dû à la pluie*

Distribution des dimensions des gouttes de pluie [Laws et Parsons, 1943]
Vitesse limite des gouttes de pluie [Gunn et Kinzer, 1949]
Indice de réfraction de l'eau à 20° C [Ray, 1972]

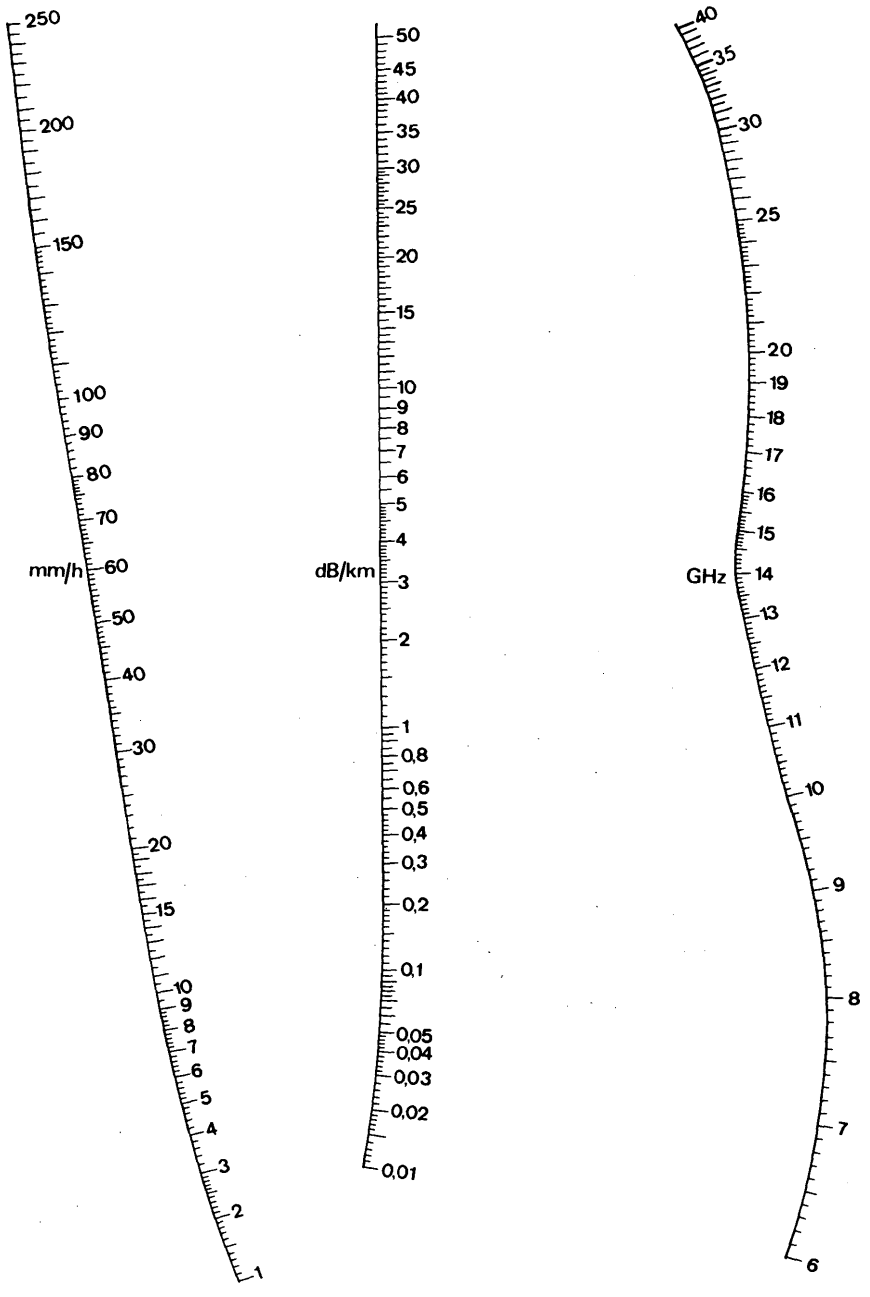



FIGURE 2 – *Affaiblissement linéique dû à la pluie*

Distribution des dimensions des gouttes de pluie [Laws et Parsons, 1943]
Vitesse limite des gouttes de pluie [Gunn et Kinzer, 1949]
Indice de réfraction de l'eau à 18°C [Ray, 1972]

Les résultats donnés dans les Fig. 1 et 2 s'appliquent généralement quand l'onde incidente est une onde plane, une onde sphérique isotrope ou une onde sphérique d'extension finie. Il ne semble pas qu'on ait étudié l'application de ces calculs à la pluie dans le champ d'induction des antennes, mais on a des raisons de penser que les erreurs seraient petites. Une autre limitation tient au fait que les calculs portent sur l'affaiblissement d'une onde cohérente et que, en toute rigueur, ils ne peuvent donc être appliqués qu'à des systèmes de transmission du type cohérent [Crane, 1971]. On a fait remarquer cependant [Hogg et Chu, 1975] que, les gouttes de pluie ayant un diagramme de rayonnement de grande ouverture (tout au moins aux hyperfréquences), une petite quantité seulement de l'énergie transmise par diffusion non cohérente pénétrera dans une antenne de réception à faisceau étroit. Autrement dit, si l'on prend certaines précautions, on pourra appliquer aussi les calculs aux systèmes de transmission du type non cohérent.

L'application de ces résultats est encore plus restreinte si l'on suppose que les gouttes de pluie sont sphériques. Comme les gouttes de pluie naturelles ne le sont pas (voir le Rapport 722), les ondes à polarisation horizontale subissent un affaiblissement plus grand que les ondes à polarisation verticale [Morita et autres, 1974; Chu, 1974]. Sous certains climats, la différence d'affaiblissement peut même atteindre 35% [Fedi et autres, 1977; Fimbel et Juy, 1977]. On peut déterminer l'affaiblissement linéique pour des polarisations verticale et horizontale et des fréquences d'au plus 100 GHz au moyen de calculs complexes, qui tiennent compte de la non-sphéricité des gouttes de pluie [Oguchi et Hosoya, 1974; Chu, 1974; Oguchi, 1977].

2.5 Pour les applications pratiques, la relation entre l'affaiblissement linéique, $\gamma_R$ (dB/km), et le taux de précipitation, $R$ (mm/h), à une fréquence donnée, peut s'exprimer approximativement par une loi exponentielle:

$$\gamma_R = kR^{\alpha} \qquad (1)$$

où les coefficients $k$ et $\alpha$ peuvent se calculer conformément à la théorie Mie-Ryde [par exemple, Olsen et autres, 1978]. On a tabulé les valeurs de $k$ et $\alpha$ pour une série de fréquences (dans la gamme de 1 à 1000 GHz), pour des températures de pluie de 0 °C et 20 °C et pour plusieurs distributions de la dimension des gouttes. [Laws et Parsons, 1943; Joss et autres, 1968]. Les valeurs correspondant à d'autres fréquences et d'autres températures de pluie peuvent se déterminer au moyen d'interpolations respectivement logarithmiques et linéaires. Pour l'étude informatique des systèmes, on a prévu aussi des expressions analytiques de $k$ et $\alpha$ en fonction de la fréquence [Misme et Benoit-Guyot, 1974; Olsen et autres, 1978].

Etant donné la complexité des phénomènes pluviaux naturels, bien que la relation entre l'affaiblissement linéique et le taux de précipitation soit applicable statistiquement à l'étude d'un système, son application à des cas de pluie déterminés demande des précautions [Fedi et autres, 1977].

## 3. Prévision de l'affaiblissement dû à la pluie sur des trajets terrestres à partir de données sur les taux de précipitation

Pour calculer l'affaiblissement dû à la pluie sur un trajet, on peut intégrer l'affaiblissement linéique sur la longueur du trajet, pour autant qu'on connaisse la variation du taux de précipitation le long de ce trajet.

Comme les statistiques d'affaiblissement varient considérablement d'une année à une autre et d'une localité à une autre, il semble très intéressant de pouvoir établir ces statistiques à partir des données météorologiques à long terme. Plusieurs méthodes ont été proposées pour prévoir les statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie sur un trajet à partir de mesures du taux de précipitation au voisinage de ce dernier: en recourant à la relation entre l'affaiblissement linéique et le taux de précipitation et en utilisant divers modèles représentant la structure spatio-temporelle de la pluie (voir le Rapport 563-1). Ces méthodes peuvent se ranger en deux groupes.

Les méthodes du premier groupe sont fondées sur la distribution cumulative du taux de précipitation mesuré en un point. Dans deux d'entre elles, cette distribution est caractérisée par la probabilité de pluie et par la médiane de l'écart type de l'approximation log-normale de la distribution conditionnelle du taux de précipitation [Lin, 1975; Misme et Fimbel, 1975]. Dans une troisième méthode de ce groupe, la distribution du taux de précipitation au point considéré est représentée approximativement par une distribution gamma, qui est caractérisée par sa moyenne et son écart type [Morita et Higuti, 1976]. On a proposé une version simplifiée de la méthode de Misme et Fimbel [Rue, 1977].

Selon la méthode rangée dans le second groupe, on établit des statistiques d'affaiblissement en convertissant des profils taux de précipitation/temps enregistrés en un point en des profils taux de précipitation/distance, par l'intermédiaire de la vitesse de translation de la cellule de pluie, dont une bonne estimation semble être la vitesse du vent, qu'on peut déterminer au niveau de 700 mb au moyen d'une radiosonde classique [Drufuca, 1974; Bertok et autres, 1977]. Cette méthode nécessite une analyse et un traitement plus détaillés des données, mais elle permet d'étudier d'autres caractéristiques d'affaiblissement telles que la durée et la distribution de probabilité commune dans le cas de bonds doubles [Drufuca et Torlaschi, 1977].

Il a été rapporté que les données statistiques d'affaiblissement obtenues expérimentalement concordent bien avec celles résultant de prévisions, dans le cas des conditions climatiques auxquelles les méthodes ci-dessus ont été appliquées. Pour généraliser la validité de ces méthodes à différents climats, il faudrait en faire des comparaisons poussées sur la base des données expérimentales disponibles. De telles comparaisons supposent qu'on tienne compte des techniques expérimentales utilisées pour obtenir les données sur le taux de précipitation (voir le Rapport 563-1) et des valeurs des coefficients entrant dans la relation entre l'affaiblissement et le taux de précipitation. Pour évaluer ces coefficients, il est recommandé d'employer les mêmes température, vitesse limite et distribution de dimension des gouttes de pluie que celles sur la base desquelles ont été établies les courbes des Fig. 1 et 2.

## 4. Prévision de l'affaiblissement dû à la pluie sur des trajets Terre-espace à partir de données sur les taux de précipitation

Les mesures du taux de précipitation au sol sont généralement d'une maigre utilité pour prévoir l'affaiblissement sur des trajets inclinés, car la corrélation entre les données, relevées cas par cas, sur l'affaiblissement de propagation et le taux de précipitation au sol est généralement médiocre. On peut améliorer légèrement cette corrélation en introduisant une correction pour tenir compte du temps que la pluie met à tomber, de la zone où se manifeste l'affaiblissement jusqu'au sol, au-dessus du pluviomètre [Fang et Harris, 1976]. On a proposé un modèle de comportement du taux de précipitation le long d'un trajet [Harden et autres, 1974-1977] et on l'a utilisé [Eaton, 1977] pour rechercher comment l'affaiblissement varie en fonction du taux de précipitation maximal, de la position de la cellule de pluie sur le trajet et de l'angle de site du trajet.

En l'absence de données expérimentales pertinentes, on peut appliquer une méthode empirique statistique pour prévoir des statistiques d'affaiblissement sur des trajets Terre-espace à partir de la distribution cumulative du taux de précipitation ponctuel relevé au sol et de la relation entre le taux de précipitation et l'affaiblissement linéique, en faisant intervenir une «distance équivalente» qui tienne compte de la non-uniformité spatiale de la pluie le long du trajet. On peut définir cette distance équivalente comme la longueur d'un trajet équivalent sur lequel une pluie ayant des caractéristiques uniformes causerait le même affaiblissement que celui constaté sur le trajet réel. Le Rapport 564-1 contient des résultats sur la variation de la distance équivalente en fonction de l'angle de site, avec le taux de précipitation comme paramètre. Ces résultats ont été obtenus à partir de distributions statistiques de l'affaiblissement le long du trajet incliné réel et du taux de précipitation ponctuel au sol au voisinage de ce trajet (les données étant recueillies pendant la même période), au moyen de la relation théorique entre l'affaiblissement linéique et le taux de précipitation.

On a décrit récemment [Henry, 1975; Hogg et Chu, 1975; Fang et Jih, 1976] des méthodes par lesquelles on peut passer de données relatives à certaines valeurs ou caractéristiques de fréquence, d'angle de site du trajet et de polarisation aux données relatives à d'autres valeurs ou caractéristiques de ces paramètres.

## 5. Affaiblissement dû à des hydrométéores autres que la pluie

Bien que la pluie soit le type d'hydrométéore le plus important qui affecte la propagation des ondes, il convient de mentionner aussi l'influence des nuages, du brouillard, de la neige et de la grêle.

Dans le cas de nuages ou de brouillard composés entièrement de gouttelettes minuscules, d'un diamètre généralement inférieur à 0,01 cm, l'approximation de Rayleigh est valide, et l'on peut exprimer l'affaiblissement en fonction de la teneur totale en eau par unité de volume [Ryde et Ryde, 1945]. L'affaiblissement linéique dans de tels nuages ou un tel brouillard s'exprime alors par la formule:

$$\gamma_c = K_l M \qquad (2)$$

où $\gamma_c$ désigne l'affaiblissement linéique (dB/km) à l'intérieur du nuage, $K_l$ l'affaiblissement spécifique (linéique et hydrique) (dB/km)/(g/m$^3$) et $M$ la teneur du nuage en eau liquide (g/m$^3$).

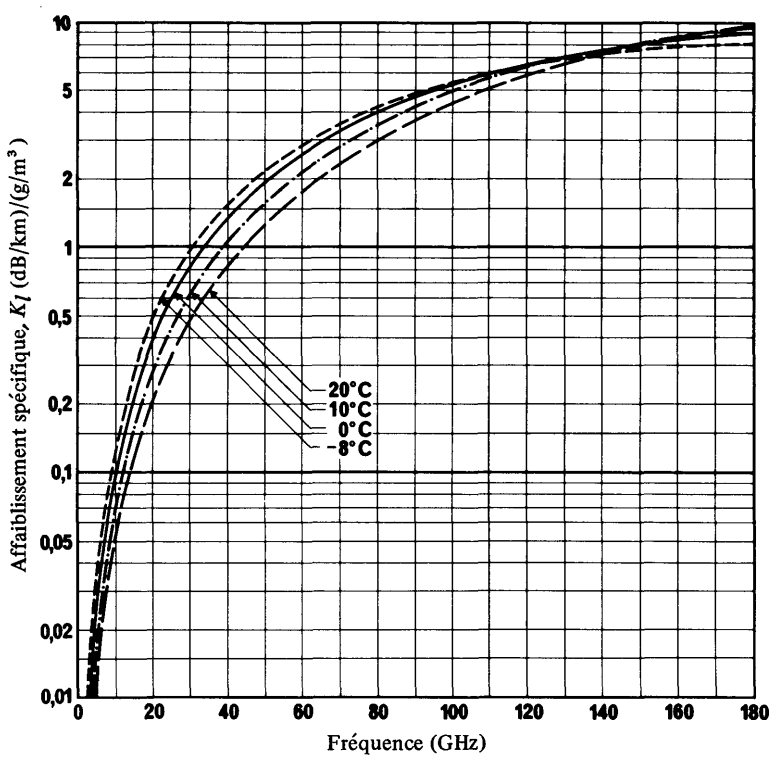



FIGURE 3 – *Variation théorique de l'affaiblissement spécifique dû à un nuage d'eau en fonction de la fréquence, pour différentes températures*

Aux Etats-Unis et dans le Royaume-Uni, on a étudié l'affaiblissement supplémentaire causé par des nuages sur des trajets Terre-espace à des fréquences atteignant 150 GHz [Lai-Iun Lo et autres, 1975; CCIR, 1974-78]. Le Tableau I montre des valeurs qui ont des chances de se vérifier aux fréquences de 95 et 150 GHz. Dans le cas d'un nuage très étendu, on peut s'attendre que l'affaiblissement varie approximativement comme cosec $\theta$, en appelant $\theta$ l'angle de site. La Fig. 3 représente une famille de courbes théoriques de la variation de l'affaiblissement spécifique en fonction de la fréquence, pour différentes températures entre $-8$ °C et 20 °C.

TABLEAU I – *Affaiblissement atmosphérique dans la direction verticale pour des fréquences de 95 et 150 GHz Slough (Royaume-Uni), d'octobre 1975 à mai 1976*

| Fréquence | 95 GHz | 150 GHz |
|---|---|---|
| Affaiblissement (dB) par temps clair; teneur en vapeur d'eau au niveau du sol, 4 – 11 g/m$^3$ | 0,7 – 1 | 1 – 3 |
| Affaiblissement supplémentaire (dB) dû aux nuages: | | |
| Strato-cumulus | 0,5 – 1 | 0,5 – 1 |
| petits cumulus de beau temps | 0,5 | 0,5 |
| grands cumulus | 1,5 | 2 |
| cumulo-nimbus | 2 – 7 | 3 – 8 |
| nimbo-stratus (nuages de pluie) | 2 – 4 | 5 – 7 |

Les nuages de glace, parce qu'ils ont des caractéristiques diélectriques différentes, donnent lieu à des affaiblissements cent fois plus petits environ que des nuages de pluie de teneur en eau identique, cela jusqu'à 35 GHz [Crane, 1977]. Aux fréquences supérieures, les nuages de glace peuvent contribuer sensiblement à l'affaiblissement.

A des fréquences inférieures à 50 GHz environ, une chute de neige sèche a peu d'effet. En revanche, aux fréquences supérieures, plusieurs mesures ont montré l'importance de l'affaiblissement dû à la neige sèche [Misme, 1966]. L'affaiblissement dû à la grêle peut être sensible au moins jusqu'à 2 GHz. Il semble que la présence de grêle n'ait d'effet sensible que pendant moins de 0,001% du temps, sous la plupart des climats.

Un affaiblissement considérable peut aussi être causé par de la neige mouillée, et il peut être important d'en tenir compte sous certains climats.

## 6. Affaiblissement et diffusion dus aux tempêtes de sable et de poussière

Les particules de sable et de poussière (voir le Rapport 563-1) sont capables d'affaiblir et de diffuser les ondes électromagnétiques, et l'on peut évaluer leurs effets en appliquant la théorie de la diffusion de Mie.

Des mesures menées en laboratoire sur des ondes de 10 GHz transmises dans une atmosphère artificiellement chargée de poussière et de sable ont montré que, pour des concentrations de particules inférieures à $10^{-5}$ g/cm$^3$, l'affaiblissement linéique n'atteindrait pas 0,1 dB/km pour le sable et 0,4 dB/km pour la poussière d'argile [Ahmed et Auchterlonie, 1976]. Dans le cas de fortes tempêtes, et pour des liaisons rasant le sol, on devrait compter que des signaux à hyperfréquences subissent un affaiblissement linéique supérieur à ces valeurs. S'agissant de radiodiffusion par satellite, où la longueur du trajet à travers des tempêtes de poussière peut varier entre 0,5 et 3 km, on peut escompter que l'affaiblissement de signaux à hyperfréquences soit inférieur à 1 dB, même par forte tempête.

Il faut poursuivre les recherches sur la structure météorologique des tempêtes de sable et de poussière et mesurer l'affaiblissement dans des conditions réelles.

## 7. Méthodes de mesure de l'affaiblissement sur un trajet

Sur des trajets sol-sol, il peut être facile de mesurer directement l'affaiblissement. Sur des trajets Terre-espace, la méthode la plus directe consiste à le mesurer sur des émissions en provenance de satellites, mais ces dernières ne se rencontrent pas pour tous les emplacements, à toutes les fréquences et tous les angles de site considérés. C'est pourquoi on a fait largement appel à des techniques de radiométrie et de radiodétection pour mesurer l'affaiblissement sur des trajets Terre-espace [Fedi et autres, 1974].

Avec les méthodes radiométriques, on peut mesurer l'affaiblissement en utilisant le Soleil comme source ou l'évaluer à partir de mesures de la température de bruit du ciel.

La radiométrie solaire permet de faire des mesures directes et suffisamment précises de l'affaiblissement, avec des appareils ayant une portée dynamique étendue. Cependant, les données ainsi obtenues sont d'une application limitée en raison du mouvement du Soleil, et aussi parce que les données statistiques ainsi recueillies risquent d'être faussées par les effets spécifiquement diurnes. D'une manière générale, il ne semble pas que les fortes précipitations soient réparties uniformément sur la durée d'un jour. En conséquence, les distributions des précipitations qu'on établit par observation du Soleil risquent de n'avoir qu'une validité limitée.

La portée dynamique des appareils de mesure de la température de bruit du ciel, sur laquelle les affaiblissements peuvent être estimés avec le degré de précision voulu à n'importe quelle fréquence, est plus limitée. En revanche, ces appareils constituent un moyen simple pour établir des données statistiques sur l'affaiblissement, quel que soit l'angle de site. Cependant, cette méthode ne permet pas de tenir compte convenablement des pertes d'énergie causées par la diffusion, ce qui risque d'aboutir à une sous-estimation de l'affaiblissement. Il faudra donc appliquer avec prudence les données obtenues à des fréquences pour lesquelles la diffusion contribue sensiblement à l'affaiblissement total [Zavody, 1974]. Des mesures faites au Royaume-Uni à des fréquences comprises dans la bande de 30 à 37 GHz ont montré que les erreurs commises en sous-estimant l'affaiblissement ont peu de chances de dépasser 15% de sa valeur en décibels en polarisation verticale, mais peuvent atteindre 35% en polarisation horizontale, si on ne tient compte de l'effet de diffusion. En revanche, à 20 GHz, dans les mêmes conditions climatiques, on peut sans doute négliger l'erreur à toutes fins pratiques [Chada et Lane, 1977].

Une autre façon d'évaluer l'affaiblissement sur un trajet incliné consiste à utiliser les observations faites en radiodétection météorologique [Strickland, 1974]. Une des limitations inhérentes à cette méthode est la nécessité de faire des hypothèses sur la relation entre la réflectivité et l'affaiblissement. De même, la diffusion par des particules de glace peut amener à surestimer l'affaiblissement.

## 8. Diffusion par les précipitations

### 8.1 *Généralités*

Par des méthodes théoriques et expérimentales, on a montré que la diffusion produite par les précipitations peut créer un couplage entre les signaux émis par deux antennes situées au sol à condition que les lobes de rayonnement de ces deux antennes se coupent en un certain volume commun de l'espace et qu'au moins certaines précipitations soient présentes dans ce volume d'intersection [Doherty et Stone, 1960; Crane, 1974]. Ce phénomène de diffusion n'est évidemment pas permanent, mais il peut jouer un rôle important dans le brouillage produit entre stations terriennes et de Terre. On en trouvera une application numérique dans le Rapport 569-1, tandis que les renseignements relatifs aux précipitations sont contenus dans le Rapport 563-1.

Le volume de diffusion dépend de l'étendue tant horizontale que verticale de la précipitation. Pour les besoins du calcul, on admet que sa section horizontale ne varie pas avec l'altitude.

Comme les particules de glace sont capables de produire une diffusion, mais une absorption négligeable, on admet, pour les calculs de diffusion, que la hauteur des cellules est un peu plus grande que la valeur à considérer dans les calculs d'absorption.

### 8.2 *Comparaison des calculs et des mesures*

Les affaiblissements de transmission que produit la diffusion due aux précipitations peuvent se calculer approximativement à l'aide des formules applicables aux radars bistatiques [Crane, 1974].

Les précipitations se manifestent sous des formes nombreuses, dont les plus importantes, eu égard à la diffusion mesurée avec un radar bistatique, sont la pluie, la neige, la neige fondante et la grêle. Les caractéristiques de la diffusion par la pluie et la neige sont représentées de façon satisfaisante par la théorie de la diffusion de Rayleigh; il n'en est pas ainsi pour la diffusion due à la grêle ou à la neige fondante. De mesures faites à 4 GHz [Crane, 1974], il ressort que les résultats fournis par les formules susmentionnées concordent généralement bien avec les résultats de mesures de la réflectivité, $Z$, faites simultanément par radiodétection à 1,3 GHz, à $\pm$ 2,7 dB près, qui est le maximum absolu admissible de l'erreur résultante des mesures effectuées avec les deux systèmes de mesure. Ces mesures portaient sur la diffusion due à la neige, la neige fondante et la pluie. Des mesures sur la diffusion due à la neige fondante ont montré que l'affaiblissement de transmission est généralement inférieur à 10 dB s'il y a diffusion quasi vers l'avant. Il est vraisemblable qu'on obtiendrait un résultat similaire pour une diffusion causée par la grêle.

D'après les données expérimentales dont on dispose actuellement, une analyse basée sur la théorie de la diffusion de Rayleigh et sur les formules du radar bistatique [Crane, 1974] permet, aux fréquences inférieures à 8 GHz environ, de prévoir les affaiblissements de transmission que produit une diffusion due aux précipitations, avec une erreur moyenne inférieure à 2 dB environ. La précision est encore meilleure si l'on tient compte des effets d'un écart de la forme des gouttes par rapport à la théorie de Rayleigh. Quand il s'agit de brouillages à des fréquences inférieures à 8 GHz, l'affaiblissement est peu sensible.

On trouvera des données plus détaillées à ce sujet dans le Rapport 569-1.

## 9. Temps de propagation dû aux précipitations

Outre qu'elle cause un affaiblissement, une précipitation peut augmenter le temps de propagation. On a calculé, en se fondant sur la théorie de la diffusion de Mie [Nuspl et autres, 1975], le déphasage et le temps de propagation de groupe spécifiques dus à la pluie. En combinant ces données avec des données statistiques sur le taux de précipitation et des évaluations de la longueur de trajet équivalent (voir le § 4), on peut prévoir des statistiques de temps de propagation. Une méthode plus souple et moins liée à la distribution de la dimension des gouttes de pluie consiste à combiner des rapports temps de propagation/affaiblissement avec des données statistiques sur l'affaiblissement et le taux de précipitation. Cependant, comme des erreurs peuvent se produire du fait que l'allure des courbes de déphasage et de temps de propagation de groupe aux fréquences élevées fait penser à une «résonance», il est recommandé de n'utiliser ces méthodes qu'à des fréquences inférieures à 15 GHz. L'importance des variations de temps de propagation dues à la pluie, en ce qui concerne les systèmes numériques de télécommunication par satellite, est examinée dans le Rapport 564-1.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


AHMED, I. Y. et AUCHTERLONIE, L. J. [1976] Microwave measurement 3 on dust, using an open resonator. *Electronics Letters*, Vol. 12, **17**, 445.

BERTOK, E., De RENZIS, G. et DRUFUCA, G. [1977] Estimate of attenuation due to rain at 11 GHz from raingauge data. Proc. URSI Open Symposium on Propagation in Non-Ionized Media, La Baule, France.

CHADA, R. et LANE, J. A. [1977] Effect of scattering in measurements of rain attenuation by passive radiometry. *Electronics Letters*, Vol. 13, 7, 177-178.

CHU, T. S. [octobre 1974] Rain-induced cross polarization at centimeter and millimeter wavelengths. *BSTJ*, Vol 53, **8**, 1557-1579.

CRANE, R. K. [février 1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter an millimeter wavelength bands. *Proc. IEEE*, Vol. 59, 173-188.

CRANE, R. K. [mars 1974] The rain range experiment – Propagation through a simulated rain environment. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-22, 321-328.

CRANE, R. K. [1975] Attenuation due to rain – A mini review. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-23, 750-752.

CRANE, R. K. [1977] Prediction of the effects of rain on satellite communication systems. *Proc. IEEE*, Vol. 65, 3, 456-474.

DOHERTY, L. M. et STONE, S. A. [1960] Forward scatter from rain. *IRE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-8, 414-418.

DRUFUCA, G. [janvier-juin 1974] Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz from raingauge observations. *Journ. Rech. Atmos.*, 399-411.

DRUFUCA, G. et TORLASCHI E. [janvier-février 1977] Rain outage performance of tandem and route diversity systems at 11 GHz. *Radio Science*, Vol. 12, 63-74.

EATON, J. L. [1977] Satellite broadcasting: slant path attenuation through rainstorms. BBC Research Report, RD 1977/7.

FANG, D. J. et HARRIS, J. M. [mai 1976] A new method of estimating microwave attenuation over a slant propagation path based on rain gauge date. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-24, 3, 381-384.

FANG, D. J. et JIH, J. [1976] A model for microwave propagation along an Earth-satellite path. *COMSAT Tech. Rev.*, 6, **2**, Fall, 379-411.

FEDI, F. et MANDARINI, P. [1973] Analysis of the influence of the various parameters on the attenuation-rain rate relation. *Modern topics in microwave propagation and air-sea interaction.* D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Hollande.

FEDI, F. et autres [1974] Attenuation: theory and measurements. *Journ. Rech. Atmos.*, Vol. 8, **1-2**, 465-472.

FEDI, F., MERLO, V. et MIGLIORINI, P. [1977] Effect of the rain rate profile along a path on rain induced attenuation. Proc. URSI Open Symposium on Propagation on Non-Ionized Media, La Baule, France.

FIMBEL, J. et JUY, M. [décembre 1977] Affaiblissements différentiels à 13 GHz sur 53 km – Comparaison à des mesures simultanées à 20,5 GHz. *Ann. télécomm.*

GUNN et KINZER [1949] The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journ. Meteorol.*, Vol. 6, **4**, 249.

HARDEN, B. N., LLEWELLYN-JONES, D. T. et ZAVODY, A. M. [1975] Investigations of attenuation by rainfall at 110 GHz in south-east England. *Proc. IEE*, **122**, 600-604.

HARDEN, B. N., NORBURY, J. R. et WHITE, W. J. K. [1976] Model of intense convective rain cells for estimating attenuation on terrestrial millimetric radio links. *Electronics Letters*, 10, 483-484.

HARDEN, B. N., NORBURY, J. R. et WHITE, W. J. K. [septembre 1977] Measurements of rainfall for studies of millimetric radio attenuation. *Proc. IEE.*

HENRY, P. S. [1975] Measurement and frequency extrapolation of microwave attenuation statistics in the Earth-space path at 13, 19 and 30 GHz. *IEEE Trans.*, AP-23, 271-274.

HOGG, D. C. et CHU, T. S. [septembre 1975] The role of rain in satellite communications. *Proc. IEEE*, Vol. 63, 1308-1331.

JOSS, J., THAMS, J. C. et WALDVOGEL, A. [1968] The variation of raindrop-size distribution at Locarno. Proc. of Int. Conf. on Cloud Physics, Toronto, Canada.

KALININ, A. I. [1974] Vliyanie prostranstvennoi neravnomernosti dozhdya na oslablenie radiovoln na nazemnykh trassakh (Spatial non-uniformity of rainfall as an attenuation factor on terrestrial radio paths). *Elecktrosvyaz*, **12**.

KALININ, A. I. [1976] Vliyanie dozhdya na oslableniye radiovoln na trassakh zemlya – ISZ (Earth-to-space path attenuation due to rainfall). *Elektrosvyaz*, 5.

LAI-IUN LO, FANNIN, B. M. et STRAITON, A. W. [1975] Attenuation of 8.6 and 3.2 mm radio waves by clouds. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-23, 782-786.

LAWS, J. O. et PARSONS, D. A. [1943] The relation of raindrop size to intensity. *Trans. American Geophys. Union*, Vol. 24, 452-460.

LIN, S. H. [juin-août 1975] A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths. *BSTJ*, Vol. 54, 1051-1086.

MARSHALL, J. S. et PALMER, W. McK. [août 1948] The distribution of raindrops with size. *Journ. Meteor.*, Vol. 5, 165-166.

MEDHURST, R. C. [1965] Rainfall attenuation of centimetre waves: Comparison of theory and measurement. *IEEE Trans.*, Vol. AP-13, 4, 550-564.

MISME, P. [novembre-décembre 1966] Etude expérimentale de la propagation des ondes millimétriques dans les bandes de 5 et de 3 mm (Experimental study of EHF propagation in the 5 and 3 mm bands). *Ann. télécomm.*

MISME, P. et BENOIT-GUYOT, G. [mars-avril 1974] Détermination de l'affaiblissement dû à la pluie pour les fréquences supérieures à 10 GHz. *Ann. télécomm.*, Vol. 23, 3/4, 132-138.

MISME, P. [1974] Simplification du calcul théorique de l'affaiblissement dû à la pluie (Simplified theoretical calculation of rainfall attenuation). *Ann. télécomm.*, Vol. 29, 3-4.

MISME, P. et FIMBEL, J. [mai-juin 1975] Détermination théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique. *Ann. télécomm.*, Vol. 30.

MORITA et autres [juillet-août 1974] Radio propagation characteristics due to rain at 20 GHz band. *Review of the ECL*, Vol. 22, 7-8, 627.

MORITA, K. et HIGUTI, I. [1976] Prediction methods for rain attenuation distributions of micro and millimetre waves. *Review of the ECL*, Vol. 24, 5-6.

NORBURY, J. R. et WHITE, W. J. K. [1972] Microwave attenuation at 35.8 GHz due to rainfall. *Electronics Letters*, 8, 91.

NUSPL, P. P., DAVIES, N. G. et OLSEN, R. L. [novembre 1975] Ranging and synchronization accuracies in a regional TDMA experiment. Proceedings of the Third International Digital Satellite Communications Conference.

OGUCHI, T. et HOSOYA, Y. [1974] Scattering properties of oblate raindrops and cross polarization of radio waves due to rain. Part II. Calculations at microwave and millimetre wave regions. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 21, 191-259.

OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppecher-and-Pitter form raindrops and cross polarization due to rain. Calculations at 11, 13, 19.3, 34.8 GHz. *Radio Science*, Vol. 12, 1, 41-51.

OLSEN, R. L., ROGERS, D. V. et HODGE, D. B. [mars 1978] The $aR^b$ relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, AP-26, 2, 318-329.

RAY, P. S. [août 1972] Broadband complex refractive indices of ice and water. *Appl. Optics*, Vol. II, 1836-1844.

ROGERS, D. V. et OLSEN, R. L. [novembre 1976] Calculation of radiowave attenuation due to rain at frequencies up to 1000 GHz. CRC Report N° 1299. Communications Research Centre, Department of Communications, Ottawa, Canada.

RUE, O. [1977] Effects of rainstorms on the system performance of multi-hop radio-relay links. Proc. URSI Open Symposium on Propagation in Non-Ionized Media, La Baule, France.

RYDE, J. W. et RYDE, D. [1945] Attenuation of centimetre waves by rain, hail, fog and clouds. General Electric Co., Wembley, Angleterre.

SANDER, I. [mars 1975] Rain attenuation of millimetre waves at $\lambda$ = 5.77, 3.3 and 2 mm. *IEEE Trans. Antennae Propagat.*, Vol. AP-23, 213-220.

SETZER, D. E. [octobre 1970] Computed transmission through rain at microwave and visible frequencies. *BSTJ*, Vol. 49, 1873-1892.

STRICKLAND, J. I. [1974] The measurement of slant path attenuation using radar, radiometers and a satellite beacon. *Journ. Rech. Atmos.*, Vol. 8, 347-358.

VAN DE HULST, H. C. [1957] Light scattering by small particles. Wiley, New York.

WALDTEUFEL, P. [mai-juin 1973] Attenuation des ondes hyperfréquences par la pluie: une mise au point. *Ann. télécomm.*, Vol. 28, 255-272.

ZAVODY, A. M. [1974] Effect of scattering by rain on radiometer measurements at millimetre wavelengths. *Proc. IEE*, Vol. 21, 257-263.

*Document du CCIR*

[1974-78]: 5/161 (Royaume-Uni).

# RAPPORT 722 *

## TRANSPOLARISATION DUE A L'ATMOSPHÈRE

(Programme d'études 5C-3/5)

(1978)

## 1. Introduction

Pour accroître la capacité en voies d'un canal radioélectrique sans augmenter sa largeur de bande, on peut recourir à des polarisations orthogonales (rectilignes ou circulaires) qui permettront deux émissions distinctes sur la même fréquence et sur le même trajet. Cette «réutilisation des fréquences» peut cependant être compromise du fait que, en se propageant dans l'atmosphère, une partie de l'énergie rayonnée avec une certaine polarisation se retrouve avec la polarisation orthogonale, ce qui entraîne du brouillage entre deux voies.

Ce phénomène, généralement désigné par le terme «transpolarisation», peut avoir pour origine la pluie ou des hydrométéores autres que la pluie ou se produire pendant des périodes de propagation par trajets multiples; une transpolarisation peut être causée aussi par les caractéristiques des systèmes d'antenne aux deux extrémités du trajet, la composante correspondante constituant alors un niveau de base.

Quand deux composantes à polarisations orthogonales *a* et *b* sont émises au même niveau, on appelle «rapport d'isolation» entre ces polarisations le rapport, en un point donné de réception du canal radioélectrique, de la composante ou signal copolaire (*ac* ou *bc*) à la composante ou signal contrapolaire (respectivement, *bx* ou *ax*); ces deux rapports jouent un rôle primordial dans la conception des systèmes. La valeur du rapport *ac/bx* n'est pas nécessairement égale à celle du rapport *bc/ax*. Dans les expériences sur la propagation, en revanche, on mesure généralement le *rapport de discrimination* entre polarisations orthogonales, qui s'applique au cas où le signal émis est à une seule composante de polarisation, *a*, et est le rapport *ac/ax*, en un point de réception donné, de la composante ou signal copolaire *ac* à la composante ou signal contrapolaire *ax*. Autrement dit, en l'absence de composante ou signal *b* émis à polarisation orthogonale par rapport à *a*, on mesure indépendamment l'un de l'autre la composante ou signal copolaire *ac* et la composante ou signal contrapolaire *ax*. S'il s'agit d'une transpolarisation induite par la pluie, on peut s'abstenir de distinguer entre les rapports *ac/bx*, *bc/ax* et *ac/ax* susmentionnés [Oguchi, 1975; Watson et Arbabi, 1973; Watson et autres, 1974].

## 2. Transpolarisation due à la pluie

### 2.1 *Généralités*

Des expériences ont prouvé que, au fur et à mesure que les gouttes de pluie grossissent, leur forme s'écarte de la sphère pour ressembler à un sphéroïde aplati, dont la base devient de plus en plus plate et, pour les gouttes de très grande taille, s'enfonce et devient concave. [Pruppacher et Beard, 1970; Pruppacher et Pitter, 1971]. En outre, les gouttes de pluie peuvent s'incliner par rapport à l'horizontale [Saunders, 1971]; le phénomène de l'obliquité des gouttes de pluie peut s'expliquer par l'existence de gradients verticaux du vent [Brussaard, 1976]. En conséquence, un modèle couramment accepté pour représenter une goutte de pluie qui tombe est un sphéroïde aplati, dont l'axe principal est oblique par rapport à l'horizontale, la déformation de la goutte dépendant du rayon de la sphère de même volume.

Conformément à ce modèle, la transpolarisation résulte d'un affaiblissement différentiel et d'un déphasage différentiel entre deux polarisations, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire à l'axe principal des gouttes de pluie aplaties, et elles dépendent des angles d'obliquité des gouttes.

Si l'angle d'obliquité est le même pour toutes les gouttes de pluie et égal à zéro, il ne se produit pas de transpolarisation dans le cas de polarisations horizontale et verticale sur un trajet horizontal. Comme l'angle d'obliquité moyen est voisin de zéro, le rapport d'isolation est meilleur sur des trajets horizontaux comportant des polarisations verticale et horizontale que s'ils comportent des polarisations rectilignes inclinées ou une polarisation circulaire.

Une transpolarisation se produit en cas de polarisation circulaire pour toutes les valeurs de l'angle d'obliquité. De plus, la transpolarisation dépend de l'angle que fait la direction de propagation de l'onde incidente avec l'axe des gouttes de pluie aplaties; elle est maximale quand cet angle est de 90°.

L'affaiblissement différentiel et le déphasage différentiel ont été l'objet de calculs approfondis, sur la base du modèle susmentionné relatif à des gouttes de pluie en chute, et les résultats de ces calculs sont disponibles pour des taux de précipitation allant jusqu'à 150 mm/h et des fréquences allant jusqu'à 100 GHz [Oguchi et Hosoya, 1974; Oguchi, 1977; Chu, 1974]. Les contributions relatives de l'affaiblissement différentiel et du déphasage différentiel dépendent de la fréquence. Le déphasage différentiel semble être le facteur dominant pour la transpolarisation induite par la pluie à des fréquences inférieures à 10 GHz (auxquelles peut se produire un phénomène de transpolarisation important même si l'affaiblissement est petit), tandis que l'affaiblissement différentiel devient de plus en plus important quand la fréquence s'élève.

Une fois connus l'affaiblissement et le déphasage différentiels pour les différentes fréquences et pour différents taux de précipitation, il faut encore connaître la distribution des angles d'obliquité des gouttes de pluie si l'on veut évaluer le rapport de discrimination.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

2.2 *Méthodes de prévision*

Pour des applications pratiques, la possibilité d'établir une relation entre le rapport de discrimination et l'affaiblissement semble du plus haut intérêt.

On a tenté d'établir cette relation en supposant que toutes les gouttes de pluie ont un même angle d'obliquité, de valeur constante, ou que la distribution de leurs angles d'obliquité est aléatoire.

En s'appuyant sur la première hypothèse, on a estimé les médianes des rapports de discrimination pour des fréquences allant jusqu'à 100 GHz, avec mise en jeu de deux paramètres empiriques (la moyenne efficace de la valeur absolue de l'angle d'obliquité et une mesure du déséquilibre entre l'occurrence d'angles d'obliquité respectivement positifs et négatifs), qu'on détermine en comparant, d'une part, les valeurs calculées et mesurées de l'affaiblissement différentiel avec, d'autre part, les données sur le rapport de discrimination [Chu, 1974]. On constate que, pour une valeur donnée de l'affaiblissement, la transpolarisation diminue quand la fréquence s'élève, mais est relativement insensible au taux de précipitation. On a proposé aussi une relation semi-empirique entre le rapport de discrimination et l'affaiblissement, où intervient un seul paramètre (l'angle d'obliquité moyen équivalent) [Watson et Arbabi, 1975].

Dans une pluie qui s'est formée naturellement, les angles d'obliquité des gouttes ont une distribution aléatoire. Pour une certaine distribution des angles d'obliquité, le rapport de discrimination dépend à la fois de leur moyenne et de leur variance. Dans le cas d'une polarisation circulaire, le seul facteur important est la variance.

Dans l'hypothèse que la distribution des angles d'obliquité des gouttes de pluie répond à une distribution gaussienne, on a établi une méthode pour évaluer le rapport de discrimination, et les valeurs ainsi calculées semblent concorder de façon satisfaisante avec les valeurs expérimentales [Kobayashi, 1977].

Des méthodes simples pour prévoir les statistiques de la transpolarisation due à la pluie sur les trajets terrestres et Terre-espace ont été présentées dans une forme qui convient aux concepteurs de systèmes. Elles sont fondées sur de bonnes approximations de la théorie générale relative à une cellule de précipitation composée de gouttes de pluie orientées au hasard. Les formules de prévision sont telles qu'on peut effectuer les calculs facilement pour différentes distributions des angles d'obliquité. En outre, il a été démontré que la transpolarisation due à la pluie, si elle se trouve dans une relation fonctionnelle avec l'affaiblissement subi sur le trajet, ne dépend que peu de la distribution des dimensions des gouttes de pluie [Nowland et autres, 1977; CCIR, 1974-78].

Les mesures et les analyses théoriques connues jusqu'ici (voir les Rapports 338-3 et 564-1) confirment que la transpolarisation est causée par la pluie, notamment sur des trajets horizontaux et quand le taux de précipitation est grand. De plus, en présence de pluie, des expériences semblent avoir prouvé la réalité d'une corrélation entre les valeurs de l'affaiblissement et celles du rapport de discrimination, pour un même pourcentage du temps de leurs distributions cumulatives. Sur la base d'études théoriques et expérimentales, on peut trouver dans les Rapports 338-3 et 564-1 des relations entre l'affaiblissement et le rapport de discrimination, respectivement pour des trajets terrestres et des trajets Terre-espace.

## 3. Transpolarisation due à des hydrométéores autres que la pluie

On a signalé l'apparition d'une transpolarisation due à une chute de neige le long d'un trajet [Hendry et autres, 1976; Howell et Thirlwell, 1977] et sur l'antenne [Evans, 1971].

Sur des trajets Terre-espace, des particules de glace situées bien au-dessus de l'altitude de la couche où elles fondent peuvent causer une forte transpolarisation, même pour un affaiblissement petit. Dans ce cas, il est vraisemblable que la corrélation entre le rapport de discrimination et l'affaiblissement sera médiocre (voir le Rapport 564-1). De plus, on a observé que certains changements brusques du rapport de discrimination coïncidaient avec des décharges atmosphériques [McEwan et autres, 1977; Howell, 1977], ce qui conduit à penser que les cristaux de glace subissent alors un changement d'orientation. Cette hypothèse est confirmée par des mesures, effectuées au radar en diversité de polarisation, de la transpolarisation causée par des nuages de glace [Hendry et McCormick, 1976; McCormick et Hendry, 1977].

## 4. Transpolarisation due à la propagation par trajets multiples

Par temps clair, on a observé une transpolarisation notable due à la propagation par trajets multiples sur une liaison à 11 GHz de 13,6 km et une liaison à 22 GHz de 4 km [Watson et autres, 1973; Turner, 1973]; sur cette dernière liaison, la transpolarisation était associée à un évanouissement du signal copolaire de moins de 2 dB. On a attribué ces phénomènes au fait que le diagramme contrapolaire de l'antenne est pointu, ce qui cause la formation d'une composante contrapolaire importante par le rayon indirect oblique.

La transpolarisation par temps clair peut s'expliquer aussi par la rotation du plan de polarisation des rayons réfléchis sur des couches qui ne sont pas perpendiculaires au plan vertical contenant l'émetteur et le récepteur [Lefrançois et autres, 1973]. Dans ce cas, on ne peut pas espérer remédier efficacement à cet état de choses en améliorant les caractéristiques contrapolaires des antennes.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRUSSAARD, G. [1976] A meteorological model for rain-induced cross-polarization. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-24, 1, 5-11.

CHU, T. S. [octobre 1974] Rain-induced cross-polarization at centimetre and millimetre wavelengths. *BSTJ*, Vol. 53, 8, 1557-1579.

EVANS, B. G. et autres [1971] Investigation of the effects of precipitation on parabolic antennae employing linear orthogonal polarizations at 11 GHz, *Electronics Letters*, Vol. 7, 13

HENDRY, A., McCORMICK, G. C. et BARGE, B. L. [juillet 1976] Ku-band and S-band observations of the differential propagation constant in snow. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-24, 521-525.

HENDRY, A. et McCORMICK, G. C [octobre 1976] Radar observations of the alignment of precipitation particles by electrostatic fields in thunderstorms. *Journ. of Geophysical Research*, Vol. 81, **30**, 5353-5357.

HOWELL, R. G. [1977] Cross-polar phase variations at 20 and 30 GHz on a satellite-Earth path. *Electronics Letters*, Vol. 13, 405.

HOWELL, R. G. et THIRLWELL, J. [1977] 20 GHz cross-polarization and dual frequency attenuation and scintillation measurements using the ATS-6 satellite. Proc. URSI Open Symposium on Propagation in Non-Ionized Media, La Baule, France.

KOBAYASHI, T. [novembre 1977] Degradation of cross-polarization isolation due to rain. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 24, **115**.

LEFRANÇOIS, G., MARTIN, L. et ROORYCK, M. [juillet-août 1973] Influence de la propagation sur la valeur de découplage de deux polarisations orthogonales. *Ann. des télécomm.*, Vol. 28.

McCORMICK, G. C. et HENDRY, A. [février 1977] Depolarization by solid hydrometeors. *Electronics Letters*, **13**, 83-84.

McEWAN, N. J., WATSON, P. A., DISSANAYAKE, A. W., HAWORTH, D. et VAKILI, V. T. [1977] Cross-polarization from high-altitude hydrometeors on a 20 GHz satellite radio path. *Electronics Letters*, **13**, 13-14.

NOWLAND, W. L., OLSEN, R. L. et SHKAROFSKY, I. P. [1977] The theoretical relationship between rain depolarization and attenuation. Soumis à *Electronics Letters*.

OGUCHI, T. [janvier-février 1977] Scattering properties of Pruppacher and Pitter form raindrops and cross-polarization due to rain: Calculations at 11, 13, 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Science*, Vol. 12, **1**, 41-51.

OGUCHI, T. [1975] Rain depolarization studies at centimeter and millimeter wavelengths: theory and measurement. *J. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 22, **107**, 165-211.

OGUCHI, T. et HOSOYA, Y. [1974] Scattering properties of oblate raindrops and cross-polarization of radio wave due to rain. Part II. Calculations at microwave and millimeter wave regions. *Journ. of Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 21, 191-259.

PRUPPACHER, H. R. et BEARD, K. V. [1970] A wind-tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. Journ. R. Met. Soc.*, **96**, 247-257.

PRUPPACHER, H. R. et PITTER, R. L. [janvier 1971] A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *Journ. Atmos. Sci.*, Vol. 28, 86-94.

SAUNDERS, M. J. [mars 1971] Cross-polarization at 18 and 30 GHz due to rain. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-19, **2**, 273-277.

TURNER, D. J. W. [1973] Measurements of cross-polar discrimination at 22 and 37 GHz. IEE Conf. Proc., **98**.

WATSON, P. A. et ARBABI, M. [1973] Cross-polarization isolation and discrimination. *Electronics Letters*, Vol. 9, **22**, 516-517.

WATSON, P. A. et autres [1973] Linear cross-polarization and attenuation measurements at 11 and 36 GHz. IEE Conf. Proc., **98**.

WATSON, P. A. et autres [1974] Microphysics of hydrometeors and polarization. *Journ. Rech. Atm.*, Vol. 8, **1/2**.

WATSON, P. A. et ARBABI, M. [janvier 1975] Semi-empirical law relating cross-polarization discrimination to fade depth for rainfall. *Electronics Letters*, Vol. 11, **2**, 42-44.

*Document du CCIR*

[1974-78]: 5/206 (Canada).

---

## RAPPORT 723 *

## STATISTIQUES DU MOIS LE PLUS DÉFAVORABLE

(Question 2-3/5)

(1978)

### 1. Introduction

Le présent Rapport porte sur les statistiques du mois le plus défavorable sur des phénomènes de propagation et des paramètres radiométéorologiques quelconques.

La notion de mois le plus défavorable est importante pour les ingénieurs chargés de la conception de systèmes de télécommunication qui doivent satisfaire à certains critères de fonctionnement pendant un pourcentage donné du temps d'un «mois quelconque». Ils doivent disposer d'une méthode permettant d'estimer le pourcentage du temps d'un mois pendant lequel un certain seuil de consigne (pour l'affaiblissement) est dépassé. A cet égard, le plus intéressant est le pourcentage du temps du mois le plus défavorable qui se manifeste une fois par an en moyenne.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

Ce Rapport, qui a été établi en réponse à la Recommandation N° CC de la CAMR(RS) 1977, propose une définition du mois le plus défavorable et présente une méthode de calcul du rapport entre, d'une part, le pourcentage du temps du mois le plus défavorable pendant lequel un certain seuil de consigne est dépassé en moyenne une fois sur une période d'une ou plusieurs années et, d'autre part, la probabilité annuelle moyenne (%) pour que ce même seuil soit dépassé.

## 2. Définition du mois le plus défavorable

Le mois le plus défavorable est, par définition, celui qui est affecté de la probabilité la plus haute pour qu'un certain seuil prédéterminé soit dépassé. La donnée statistique du mois le plus défavorable qui présente de l'intérêt est la probabilité mensuelle maximale de dépassement du seuil à laquelle on peut s'attendre en moyenne une fois sur une période d'une ou plusieurs années. Pour pouvoir établir cette donnée statistique du mois le plus défavorable, le seuil et le nombre d'années (période de récurrence) doivent avoir été spécifiés.

Si l'on veut déterminer le mois le plus défavorable d'une année quelconque, il faut connaître les probabilités mensuelles de dépassement du seuil pour chaque mois de l'année considérée. Par souci de commodité, il est recommandé d'utiliser le mois civil comme base pour établir les probabilités mensuelles. Pour faciliter l'exposé, appelons $X_{ij}$ la probabilité de dépassement du seuil $j$ au cours du $i$-ème mois. Le mois le plus défavorable pour le seuil $j$ est celui qui est affecté de la probabilité $X_{ij}$ la plus haute, soit $X_{hj}$. Le mois civil affecté de $X_{hj}$ peut différer d'un seuil à un autre. La distribution du mois le plus défavorable pour une certaine année est exprimée par $X_{hj}$, fonction de $j$; c'est l'enveloppe des probabilités mensuelles maximales de toutes les distributions cumulatives mensuelles établies pour l'année considérée.

La donnée statistique du mois le plus défavorable est la valeur de $X_{hj}$ que l'on peut s'attendre à observer en moyenne une fois sur une période d'une ou plusieurs années. On peut établir cette donnée statistique d'après les pourcentages de temps de dépassement pour le mois le plus défavorable, $X_{hj}$, qui ont été relevés pendant de nombreuses années. Il est préférable, à cet effet, d'utiliser un ensemble complet de probabilités mensuelles, $X_{ij}$; on dispose ainsi d'une plus grande masse d'information, qui fournit une estimation plus fiable de la valeur extrême cherchée [Gumbel, 1957]. Comme, dans de nombreux cas, les occurrences des événements rares considérés sont géographiquement indépendantes les unes des autres, à condition que les lieux d'observation soient suffisamment espacés, on doit grouper ensemble des valeurs de $X_{ij}$ relevées en plusieurs lieux. Il faut cependant, par prudence, s'assurer que les lieux d'observation correspondent à des caractéristiques de propagation et de climat similaires.

Une hypothèse sur laquelle repose l'établissement de la donnée statistique du mois le plus défavorable est que les événements rares qui présentent de l'intérêt peuvent survenir aléatoirement pendant un mois civil quelconque. L'estimation statistique de leur occurrence ne dépend pas de l'époque de début ou de fin d'un «mois». La donnée statistique du mois le plus défavorable s'applique alors à un mois civil ou à une période quelconque de 30 jours au cours d'une période de 12 mois consécutifs (une «année»).

## 3. Application de la définition

La Fig. 1 illustre par deux exemples la fonction de distribution cumulative des probabilités mensuelles de dépassement de seuils prédéterminés, $X_{ij}$. Ces données proviennent de mesures de l'affaiblissement à deux fréquences, effectuées en Suisse [Fiechter, 1974] sur un même trajet à visibilité directe, pour un seuil de 29 dB à 11 GHz et de 19 dB à 7 GHz. On note l'allure quasi exponentielle de la queue de la fonction de distribution, surtout à 7 GHz, particularité souvent prévisible pour des événements rares [Gumbel, 1957].

En assimilant à une exponentielle la queue de la fonction de distribution, on peut obtenir la donnée statistique intéressante, c'est-à-dire la valeur de $X_{hj}$ que l'on peut s'attendre à observer une fois sur une période de $N$ années. Les résultats, pour une fonction de distribution exponentielle, sont donnés pour faciliter l'application. Les valeurs nécessaires à ce calcul peuvent aussi être tirées de la fonction de distribution empirique, à condition de disposer de données suffisamment nombreuses.

La donnée statistique cherchée est la probabilité d'occurrence de $X_{hj}$ sur une période de $N$ années. Elle s'exprime par la formule:

$$P(X_{hj}) = \frac{1}{12N} \tag{1}$$

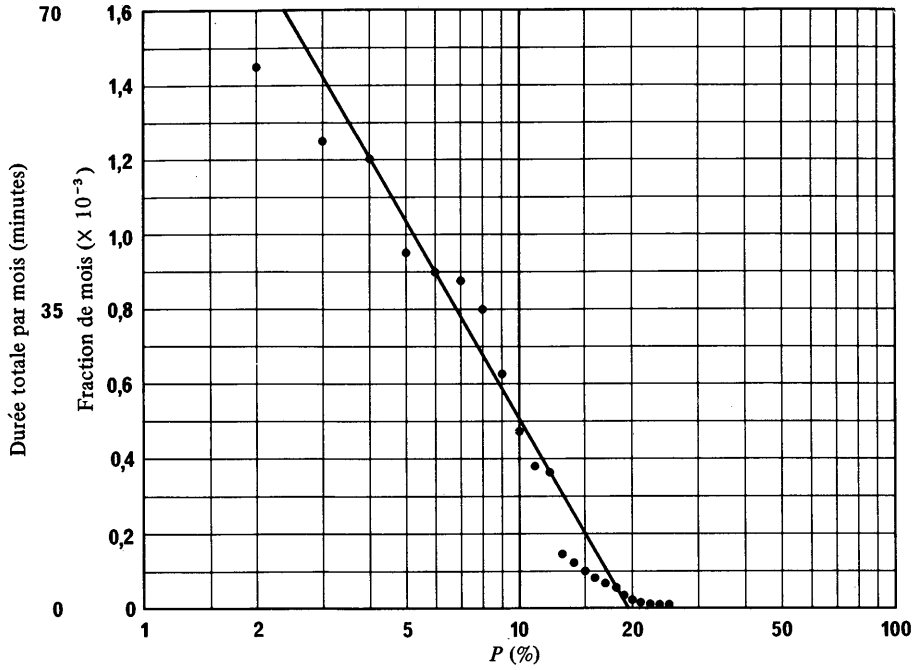
En adoptant le modèle exponentiel, il vient:

$$P(X_{hj}) = \frac{1}{12N} = C_0 e^{-X_{hj}/C_1} \tag{2}$$

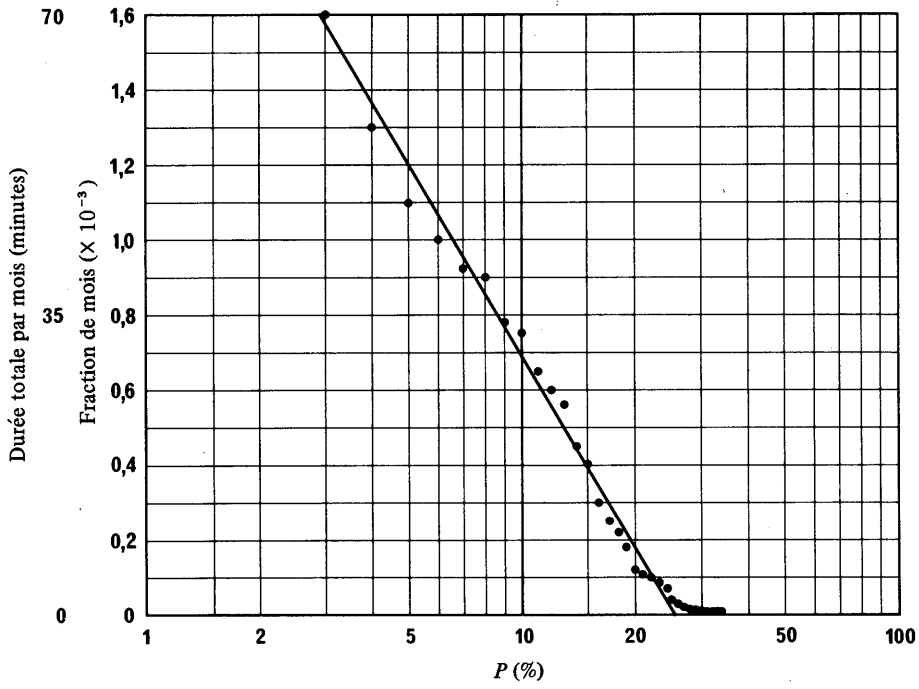
et

$$X_{hj} = C_1 \log_e (12NC_0) \tag{3}$$

donnée statistique cherchée, $C_0$ et $C_1$ étant des constantes à déterminer.




*a)* 11 GHz
31 mois
Seuil d'affaiblissement :
29 dB au-dessous de la médiane




*b)* 7 GHz
44 mois
Seuil d'affaiblissement :
19 dB au-dessous de la médiane

FIGURE 1 – *Probabilité, P, que le seuil prédéterminé d'affaiblissement soit dépassé pendant la fraction ou la durée totale indiquée du mois*

Il est souvent utile de rapporter cette donnée statistique à la probabilité annuelle de dépassement du même seuil pendant une année moyenne, $Y_j$. Le rapport entre le pourcentage du temps pendant lequel le seuil est dépassé au cours du mois le plus défavorable et le pourcentage du temps de dépassement pendant une année moyenne a pour expression:

$$Q_{jN} = \frac{X_{hj}}{Y_j} \tag{4}$$

Mais, avec le modèle exponentiel, on peut écrire:

$$Y_j = -\int X_{ij} \frac{\mathrm{d}P(X_{ij})}{\mathrm{d}X_{ij}} \mathrm{d}X_{ij} = C_1 C_0 \tag{5}$$

L'expression du rapport cherché prend donc la forme:

$$Q_{jN} = \frac{\log_e (12\, NC_0)}{C_0} \tag{6}$$

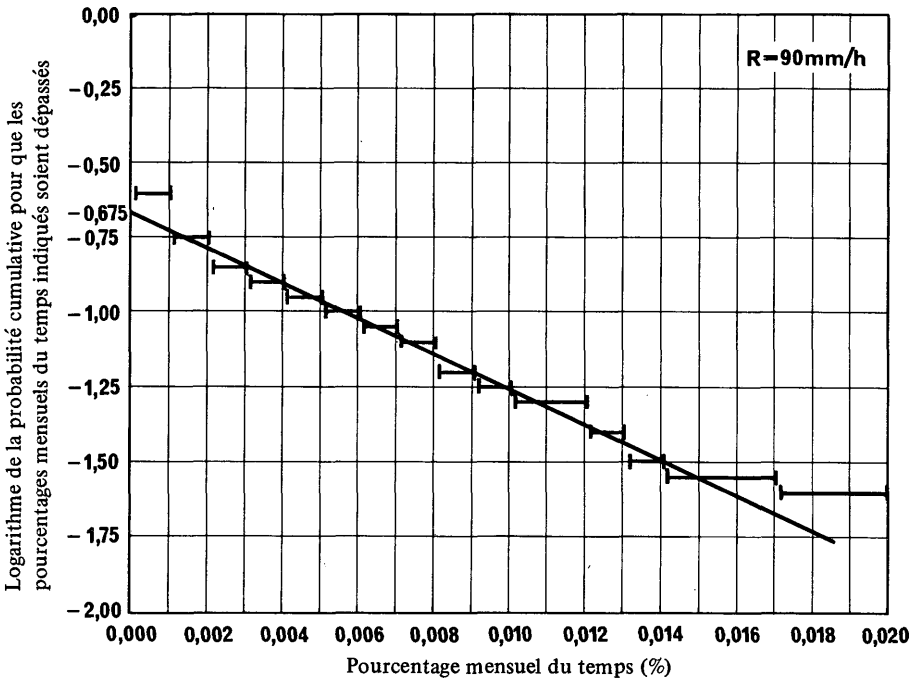



FIGURE 2

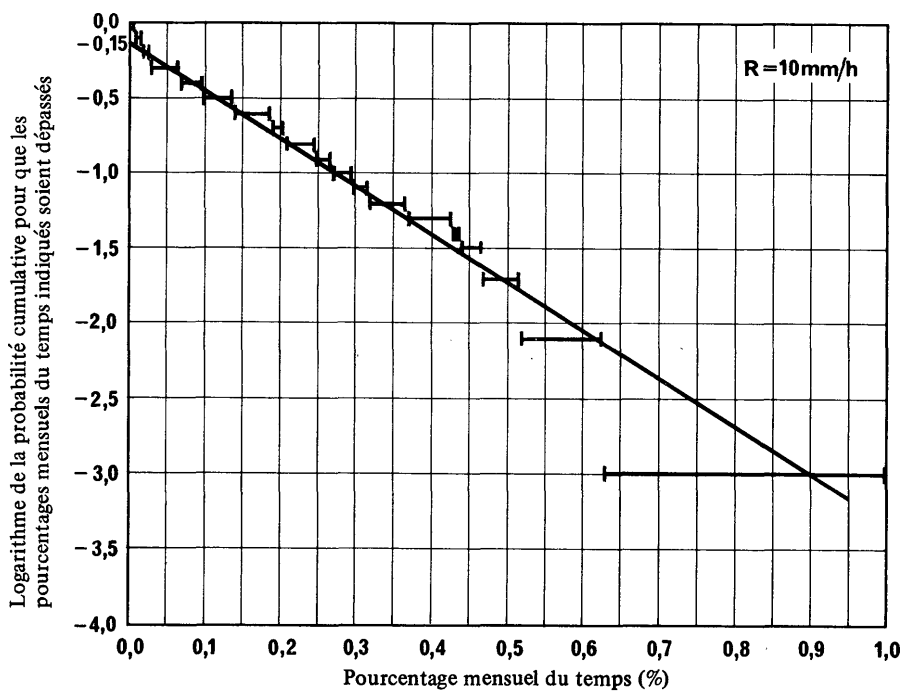



FIGURE 3

## 4. Application du modèle

A titre d'application du modèle exponentiel, considérons les observations du taux de précipitation présentées dans les Fig. 2 et 3 pour des seuils de 90 mm/h et 10 mm/h respectivement. Ces observations, qui ont été faites sur une période de 4 ans au moyen de 8 pluviomètres installés dans 8 localités de la partie plate de la Suisse ont fourni au total 347 lieux-mois de données [Debrunner, 1977]. Les valeurs du rapport $Q_{jN}$ sont indiquées dans le Tableau I.

TABLEAU I – *Rapport entre le pourcentage du temps de dépassement du seuil pendant le mois le plus défavorable et le pourcentage correspondant pendant une année moyenne, $Q_{jN}$*

| Seuil, $j$ | $Q_{jN}$ pour une période de récurrence $N$ | | |
|---|---|---|---|
| | $N = 1$ | $N = 3$ | $N = 10$ |
| 90 mm/h | 4,5 | 9,5 | 15,0 |
| 10 mm/h | 3,0 | 4,5 | 6,0 |

Les estimations de $Q_{jN}$ qui figurent au Tableau I concordent bien avec les rapports qu'on obtient en évaluant la probabilité de dépassement du seuil au cours du mois le plus défavorable, $X_{hj}$, pour chaque année et chaque lieu et en établissant une moyenne des probabilités ainsi obtenues sur toutes les années et toutes les localités [CCIR, 1974-78a].

## 5. Limites du rapport $Q_{jN}$

Le rapport $Q_{jN}$ dépend à la fois du climat et de la topographie de la région considérée. Il est aussi fonction de la durée de la période d'observation, jusqu'à ce que les échantillons aient été prélevés en nombre suffisant pour fournir une estimation statistiquement stable. On peut fixer les limites suivantes au rapport afférent à une période de récurrence d'une année, $Q_{j1}$, à condition de connaître le comportement saisonnier des événements rares à considérer à l'intérieur d'une région climatique:

$$1 < Q_{j1} < 12 \tag{7}$$

La limite supérieure correspondant à une situation où les phénomènes de propagation peuvent se produire pendant un seul mois civil, la limite inférieure à une situation où ils peuvent se produire avec une égale probabilité pendant tous les mois civils d'une année.

En réalité, ces limites ne sont pas atteintes, parce que la plupart des phénomènes intéressants se produisent le plus souvent pendant un nombre restreint de mois ou de saisons. En appelant $M$ ce nombre restreint de mois, les limites deviennent pratiquement:

$$\frac{12}{M} < Q_{j1} < 12 \tag{8}$$

En pratique, la limite inférieure correspond presque à des données dont les probabilités d'occurrence annuelle sont comprises entre 0,1 et 0,001%. Les valeurs du rapport présentées dans le Tableau I relativement à la partie plate de la Suisse sont proches de la limite inférieure pour les deux seuils de 90 et 10 mm/h. Les résultats obtenus aux États-Unis sur une période d'observation de 10 années dans 4 stations indiquent que la limite inférieure représente une bonne estimation pour des probabilités annuelles moyennes comprises entre 0,005 et 0,01% [CCIR, 1974-78b]. Les valeurs du rapport qui résultent d'observations de l'affaiblissement faites en Europe varient entre les deux limites en fonction du lieu et de la probabilité mensuelle ($X_{hj}$) [Brussaard, 1977].

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRUSSAARD, G. [1977] Rain attenuation on satellite-Earth paths at 11.4 and 14 GHz. Conférence de l'URSI sur la propagation dans les milieux non ionisés, La Baule, France.

DEBRUNNER, W. E. [1977] Niederschlagsstatistiken zur Beschreibung der Regendämpfung von Mikrowellen (Statistiques des précipitations pour la description de l'affaiblissement par la pluie aux hyperfréquences). Rapport N° VD21.051, Division recherche et développement de la Direction générale des PTT, Berne, Suisse.

FIECHTER, M. [1974] Ausbreitungs messungen auf der Strecke Jungfraujoch-St. Chrischona (Mesures de propagation sur le trajet Jungfraujoch-St. Chrischona). Rapports N$^{os}$ VD32.020 et VD32.021, Division recherche et développement de la Direction générale des PTT, Berne, Suisse.

GUMBEL, E. J. [1957] *Statistics of extremes.* Columbia University Press, New York.

*Documents du CCIR*

[1974-78]: **a.** 5/230 (Suisse); **b.** 5/256 (Secrétariat du CCIR).

SECTION 5D: ASPECTS RELATIFS A LA RADIODIFFUSION ET AUX SERVICES MOBILES

*Avis et Rapports*

AVIS 370-3 *

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

**Services de radiodiffusion *****

(Programme d'études 7D/5)

(1951 - 1953 - 1956 - 1959 - 1963 - 1966 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

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 239-4),

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que les courbes 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. Si les valeurs de champ doivent être rapportées au champ rayonné en espace libre par une source isotrope fictive, ces valeurs peuvent être déduites de celles des courbes en soustrayant 2,15 dB;

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 $\Delta h$ est utilisé pour définir le degré d'irrégularité du terrain; il représente la différence entre les altitudes dépassées par 10% et 90% du terrain sur le trajet de propagation entre 10 km et 50 km de distance de l'émetteur (voir la Fig. 6);

1.5 des méthodes permettant de déterminer les champs au-dessus de trajets mixtes terre-mer sont décrites dans le Rapport 239-4;

1.6 l'effet d'une modification de la hauteur de l'antenne de réception est indiqué dans la Fig. 18 et dans les Annexes I et II. Les Rapports 239-4 (§ 4.4) et 567-1 traitent également de cet effet;

1.7 il convient de tenir compte de l'affaiblissement dû à un terrain boisé ou à la végétation (voir la Fig. 2 du Rapport 236-4).

---

* Cet Avis doit être porté à l'attention des Commissions d'études 8, 10 et 11.

** 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.

*** En ce qui concerne l'utilisation, dans les services mobiles terrestres, des courbes de propagation décrites dans le présent Avis, il convient de se référer au Rapport 567-1.

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

## ANNEXE I

### BANDES DES ONDES MÉTRIQUES (30 A 250 MHz)

1. Les courbes de l'Annexe I ont été établies principalement à l'aide de données fournies par les Etats-Unis d'Amérique et par les pays d'Europe occidentale; beaucoup plus de mesures ont été faites aux distances allant jusqu'à environ 500 km qu'aux distances supérieures et, ainsi, les courbes ont leur fiabilité plus grande jusqu'à 500 km environ.

2. Les Fig. 1 à 4c indiquent les champs dépassés pour 50% des emplacements de réception pendant, respectivement, 50%, 10%, 5% et 1% du temps. Les courbes correspondant à des valeurs dépassées pendant 50% du temps sont valables pour tous les trajets. Les courbes représentées à la Fig. 2a et correspondant aux valeurs dépassées pendant 10% du temps sont valables pour les trajets terrestres et maritimes dans la région de la mer du Nord. Les Fig. 3a et 4b contiennent les courbes correspondant aux valeurs dépassées pendant 5% et 1% du temps sur des trajets maritimes dans la région de la mer du Nord, tandis que les Fig. 2b, 3b et 4c indiquent les valeurs dépassées pendant, respectivement, 10%, 5% et 1% du temps sur les trajets maritimes de la région méditerranéenne. L'expérience a montré qu'en Méditerranée et dans le golfe du Mexique, plus spécialement en été, les champs peuvent dépasser d'une valeur pouvant atteindre 20 dB ceux des courbes relatives à la mer du Nord, pour des distances supérieures à 200 km environ.

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

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

Ni les courbes des Fig. 1, 2a ou 4a, ni la courbe de distribution de la Fig. 5 ne peuvent donner des indications très exactes dans le cas de terrains très vallonnés ou montagneux. Il convient d'utiliser, pour les bandes II et III et pour ces types de terrain, la valeur du facteur de correction d'affaiblissement (en dB) indiqué à la Fig. 7.

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 $\Delta N$ 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 $\Delta N$ 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 $\Delta N$, 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, 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 estimations des valeurs du champ sur des trajets mixtes devront être faites selon les méthodes décrites dans le Rapport 239-4.

6. Les valeurs médianes de gain que l'on peut espérer obtenir en relevant la hauteur de l'antenne de réception de 3 à 10 m au-dessus du niveau du sol sont: dans les bandes I et II, 9 dB pour un terrain accidenté ou plat dans les zones urbaines et rurales; dans la bande III, 7 dB pour un terrain plat dans les zones rurales et 11 dB pour un terrain urbain ou accidenté. Ces valeurs s'appliquent à des distances jusqu'à 50 km. Pour des distances dépassant 100 km, il convient de réduire ces valeurs de 50%, et d'utiliser une interpolation linéaire pour les distances intermédiaires.

7. L'ionosphère peut influencer la propagation aux fréquences inférieures des ondes métriques, en particulier aux fréquences inférieures à 90 MHz environ, ceci principalement par les effets de l'ionisation sporadique de la couche E. Dans certaines circonstances, ce mode de propagation peut influencer le champ dépassé pendant de faibles pourcentages de temps à des distances de plus de 500 km environ; dans la région de l'équateur magnétique et dans la zone aurorale, des pourcentages plus élevés du temps peuvent être atteints. Néanmoins, on peut généralement négliger ces effets ionosphériques pour la plupart des applications où l'on se réfère au présent Avis, et les courbes de propagation de la présente Annexe ont été établies dans cette hypothèse. Voir le Rapport 259-3 du Volume VI pour vérifier le bien-fondé de cette hypothèse.

## ANNEXE II

### BANDES DES ONDES DÉCIMÉTRIQUES (450 A 1000 MHz)

**1.** Les Fig. 9, 10 et 11 représentent les champs dépassés en 50% des emplacements pendant respectivement 50%, 10% et 1% du temps sur des trajets terrestres. Elles se rapportent à un type de terrain moyennement vallonné que l'on rencontre fréquemment en Europe et en Amérique du Nord et qui est caractérisé par une valeur $\Delta h$ = 50 m. Pour les $\Delta h$ supérieurs ou inférieurs à cette valeur, il convient d'appliquer une correction à ces courbes telle qu'elle est donnée dans la Fig. 8.

**2.** On estime que les champs indiqués dans les Fig. 9, 10 et 11 sont dépassés en 50% des points de réception sur un terrain moyennement vallonné, tel qu'on le rencontre fréquemment en Europe et en Amérique du Nord. Pour ce type de terrain, les champs pour d'autres pourcentages des emplacements de réception peuvent être obtenus à l'aide des courbes de distribution données dans la Fig. 12.

**3.** La Fig. 13 donne les valeurs du champ dépassé en 50% des points de réception dans des régions côtières pendant 50% du temps; cette figure se rapporte à la propagation dans la région de la mer du Nord et dans les parties centre et nord de la mer Méditerranée. Les Fig. 14a, 15a et 16a donnent les valeurs du champ dépassé pendant 10%, 5% et 1% du temps respectivement; elles se rapportent à la propagation dans la région de la mer du Nord tandis que les Fig. 14b, 15b et 16b se rapportent à la propagation dans les parties centre et nord de la mer Méditerranée, pendant les mêmes pourcentages de temps.

**4.** Ces courbes sont basées sur des valeurs à long terme (plusieurs années) et peuvent être considérées comme étant représentatives des conditions climatiques moyennes qui règnent dans toutes les régions tempérées. Il convient de noter, cependant, que pour des périodes courtes (quelques heures par exemple, voire quelques jours) il peut exister des champs très supérieurs à ceux indiqués dans les Fig. 9 à 16 inclusivement.

**5.** Les estimations des valeurs du champ sur des trajets mixtes devront être faites selon les méthodes décrites dans le Rapport 239-4. A titre d'exemples de la méthode d'interpolation, les Fig. 17a et 17b donnent les résultats lorsque la méthode est appliquée à la région de la mer du Nord.

**6.** Les valeurs médianes de gain que l'on peut espérer obtenir en relevant la hauteur de l'antenne de réception de 3 à 10 m au-dessus du niveau du sol dépendent beaucoup de l'irrégularité du terrain dans les zones rurales. La Fig. 18 représente la variation de la valeur médiane en fonction de $\Delta h$. On peut estimer la valeur médiane à 7 dB pour les zones de banlieue et à 14 dB pour les zones urbaines. Les valeurs indiquées ci-dessus s'appliquent à des distances jusqu'à 50 km. Pour des distances dépassant 100 km, il convient de réduire ces valeurs de 50%, comme sur la Fig. 18, et d'utiliser une interpolation linéaire pour les distances intermédiaires.

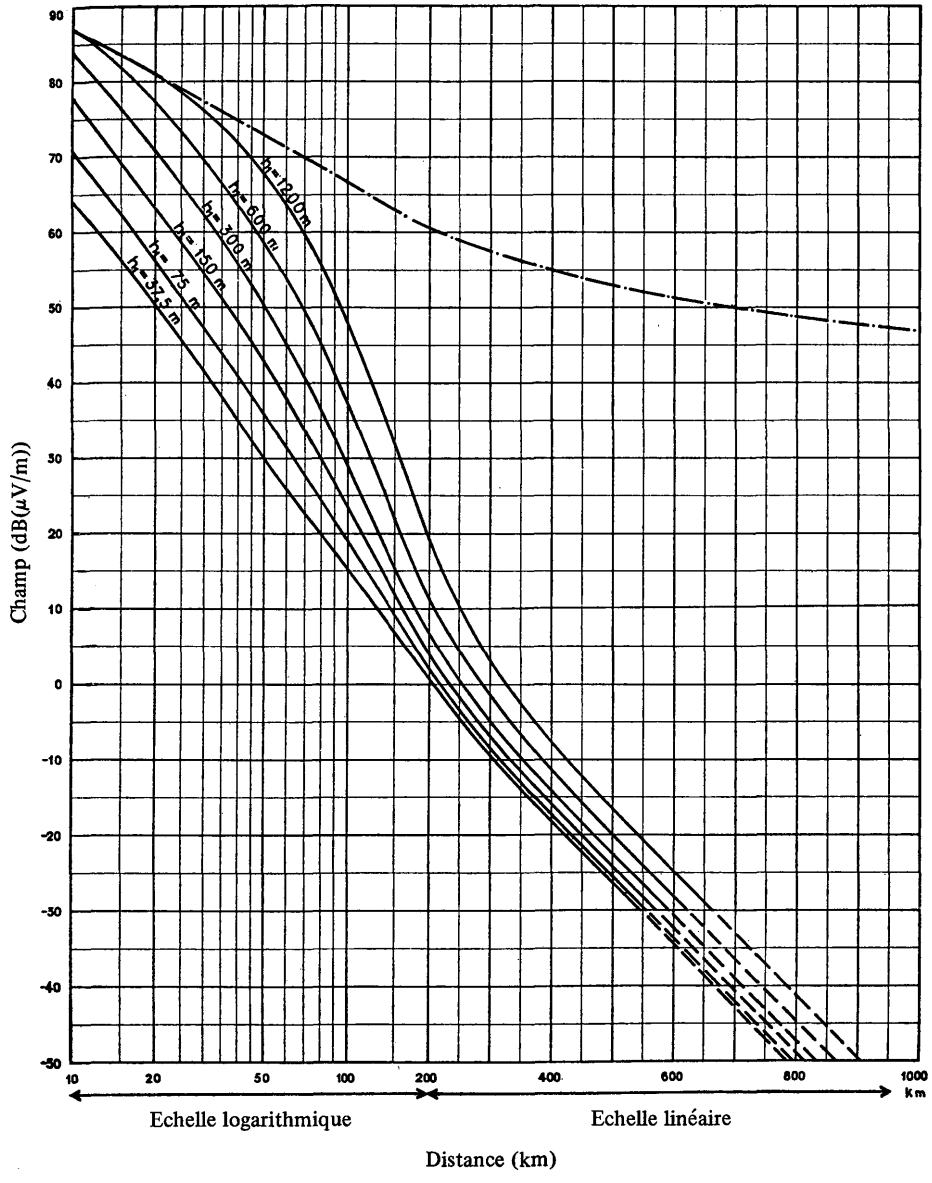



FIGURE 1 – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

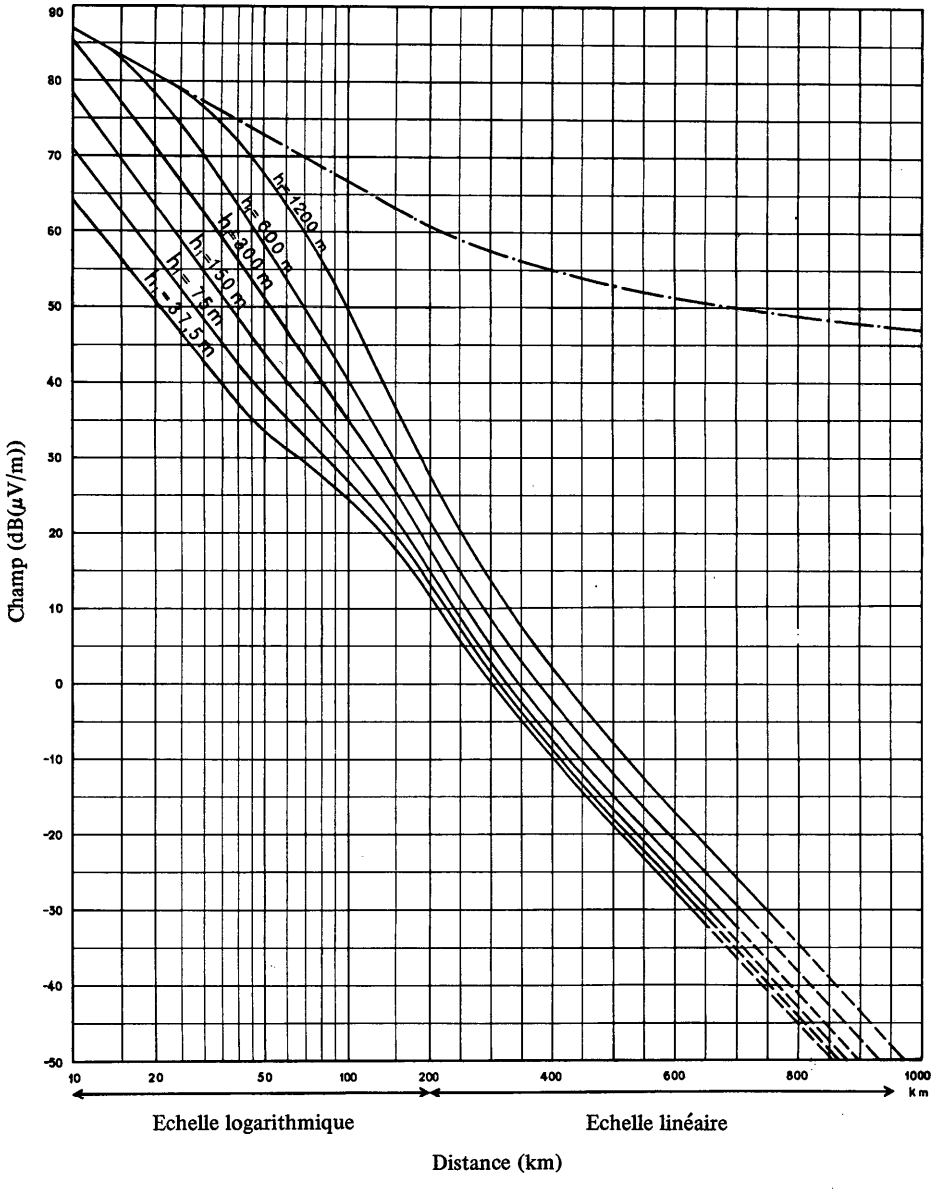



FIGURE 2*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

—·—·— Espace libre

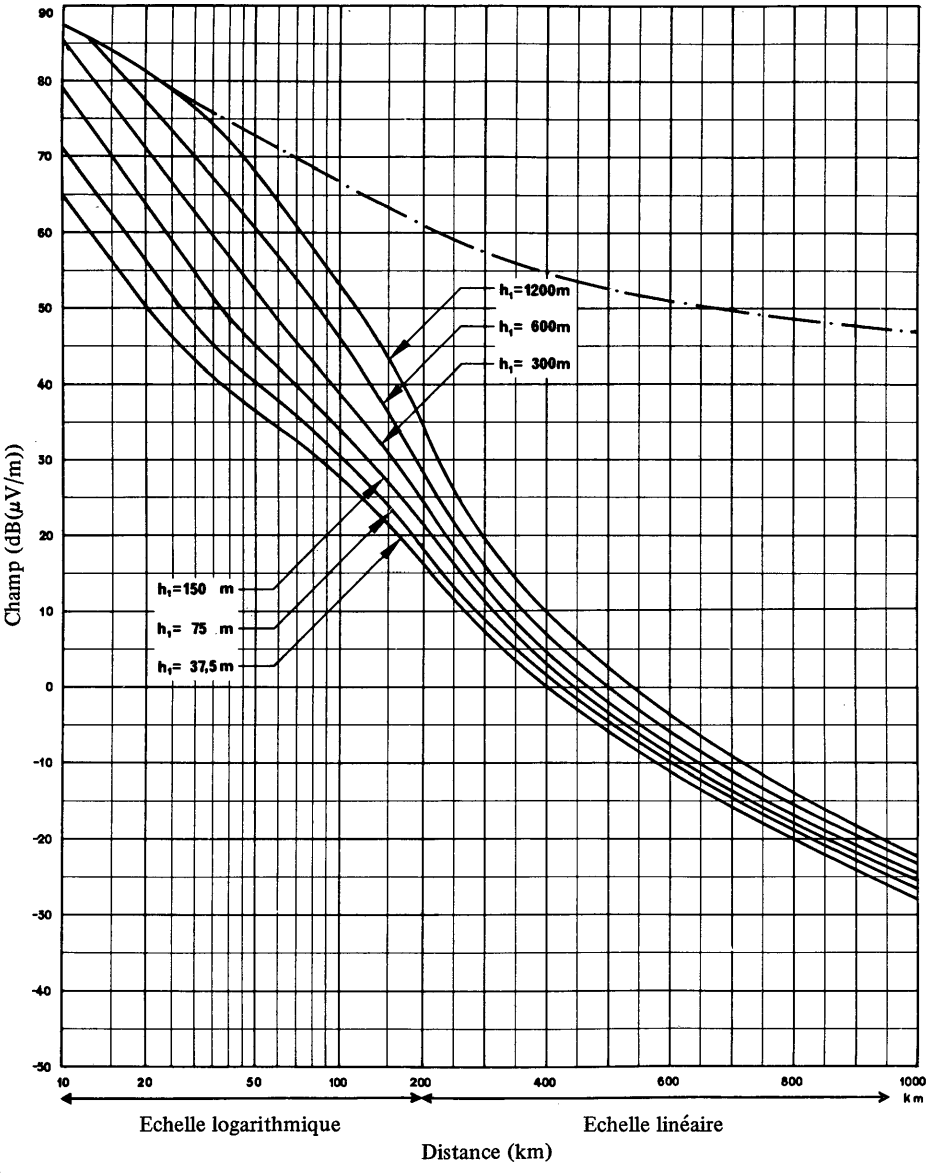



FIGURE 2*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

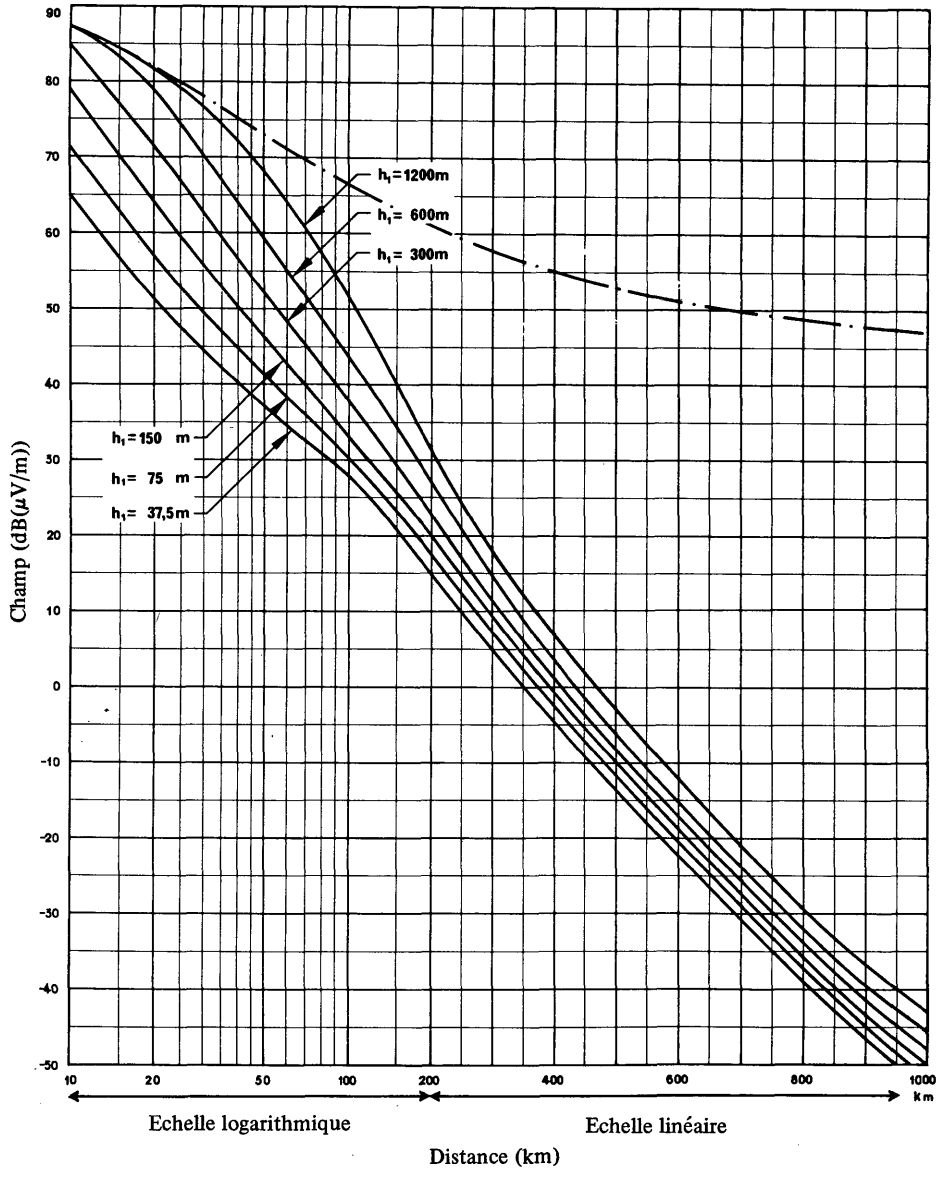



FIGURE 3*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 30 à 250 MHz (bandes I, II et III) – mer du Nord –
5 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2 = 10$ m

·—·—·—· Espace libre

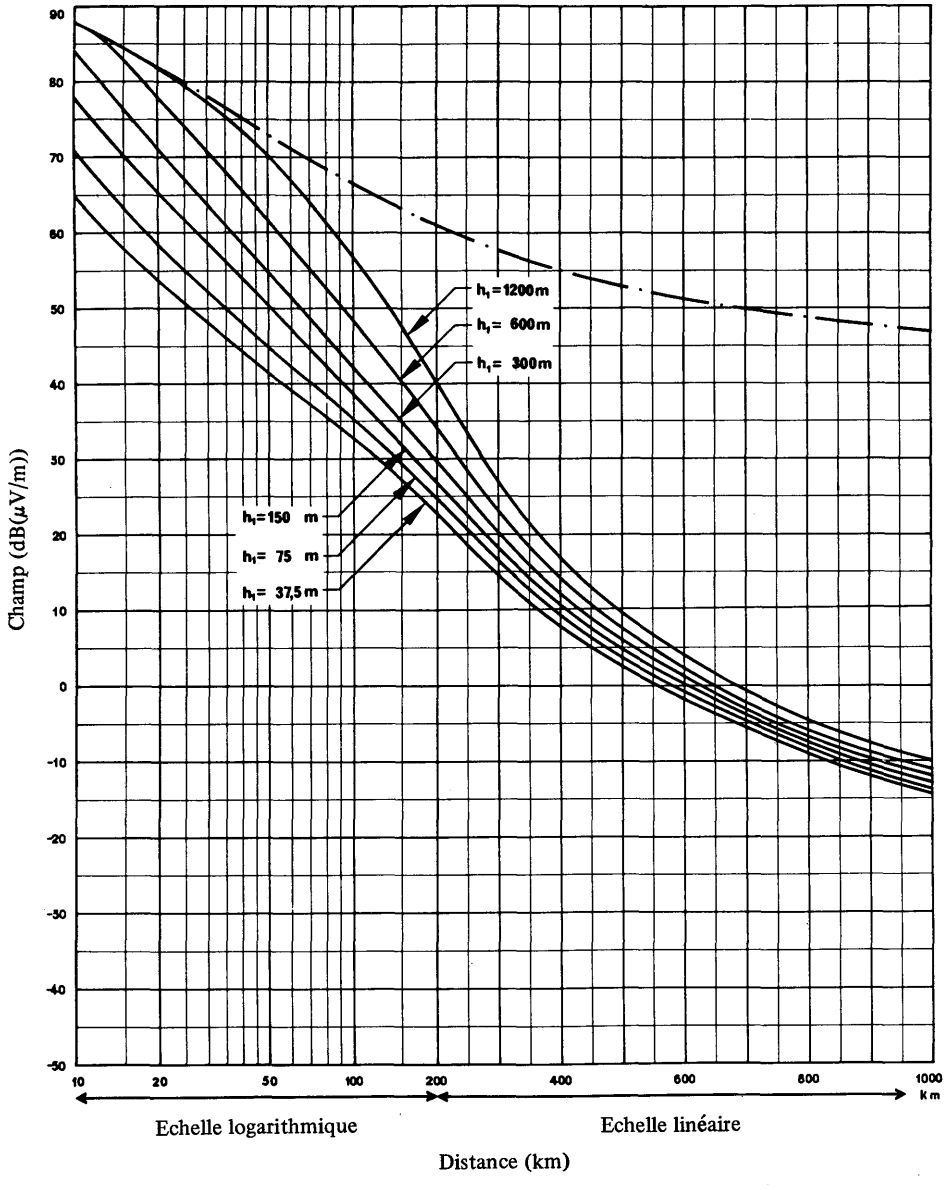



FIGURE 3*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

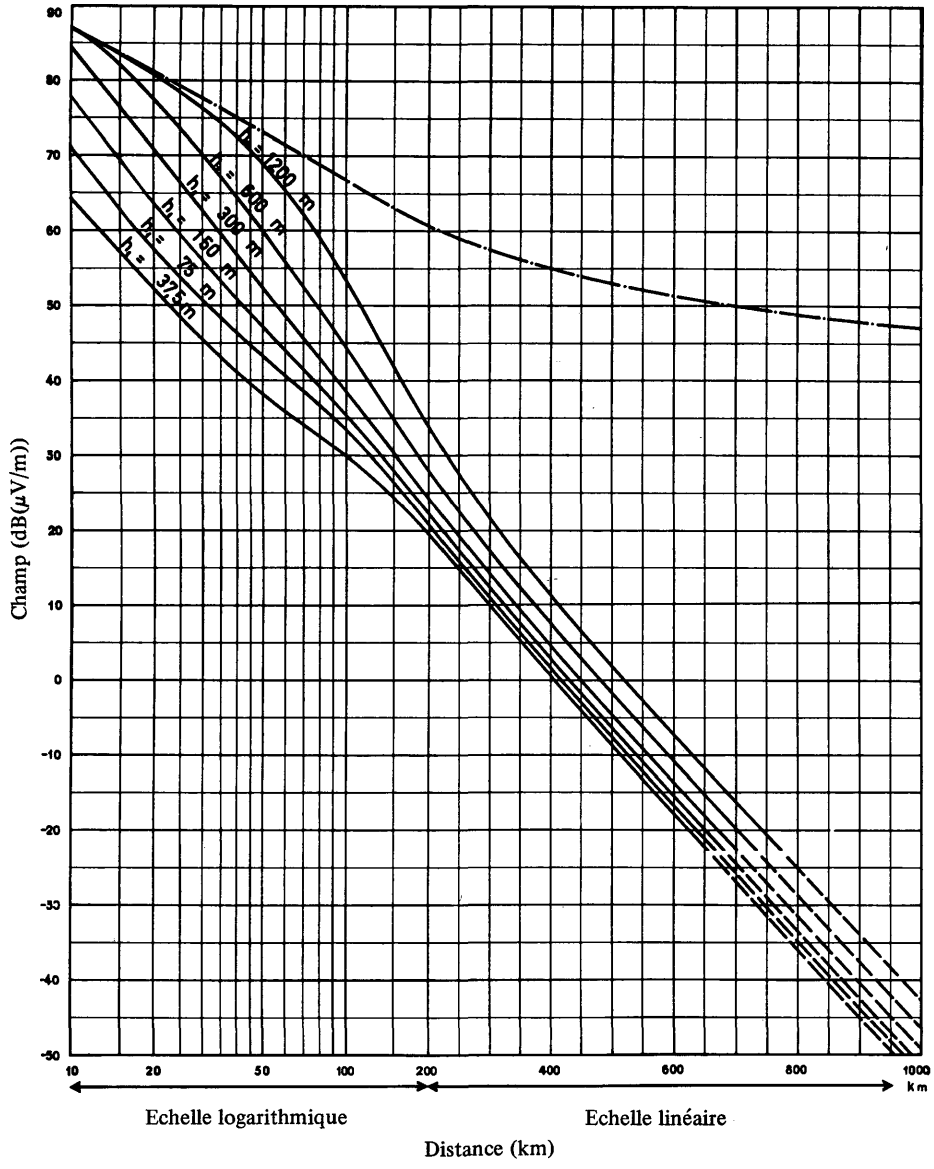



FIGURE 4*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

—·—·— Espace libre

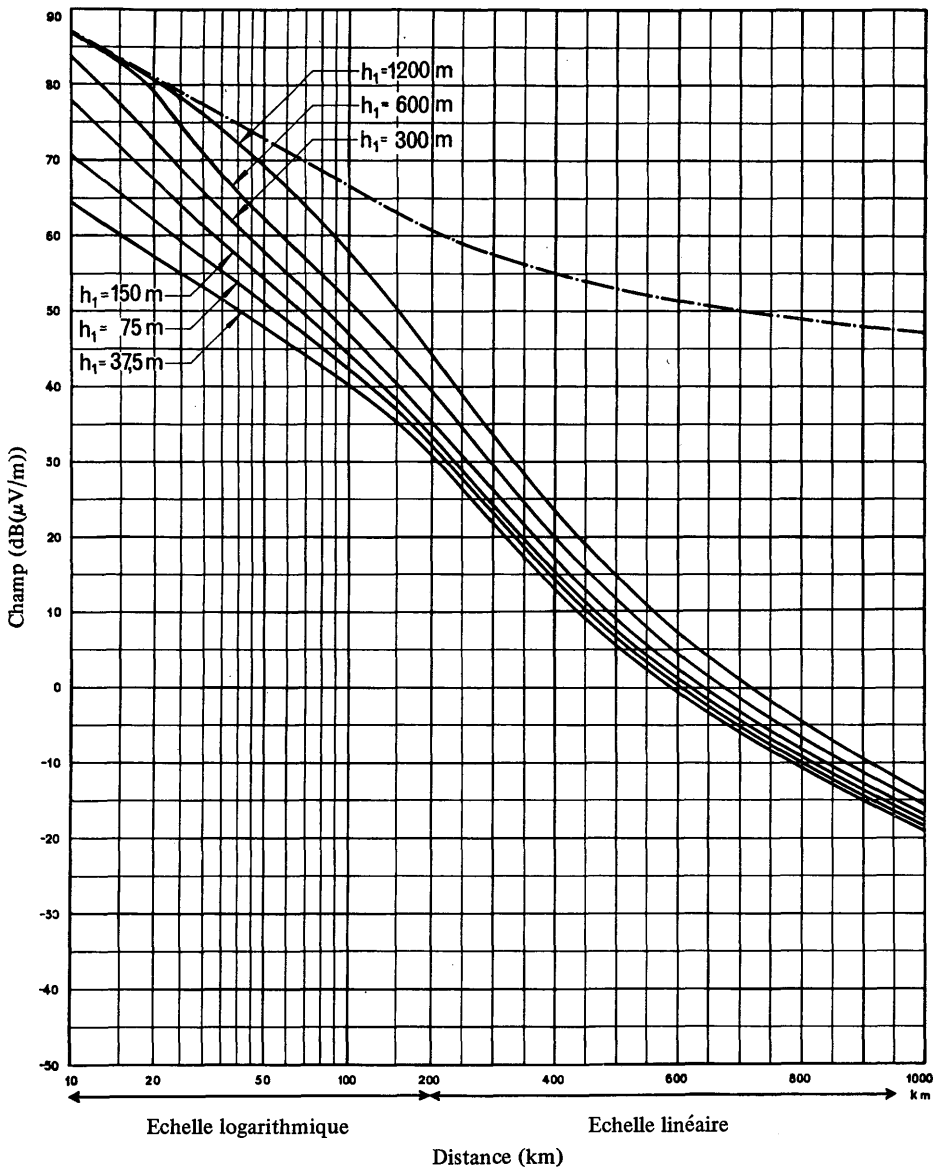



FIGURE 4*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

—·—·— Espace libre

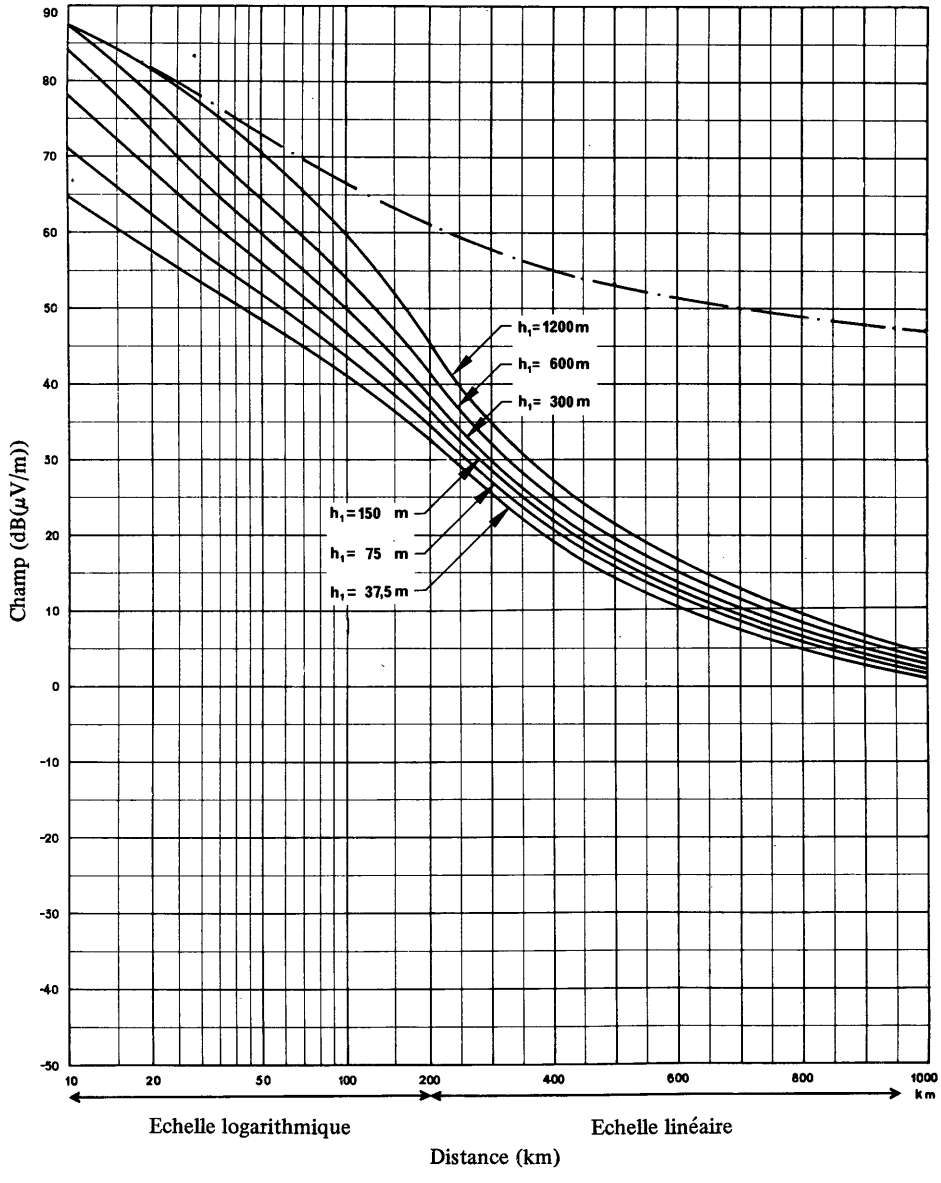



FIGURE 4*c* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

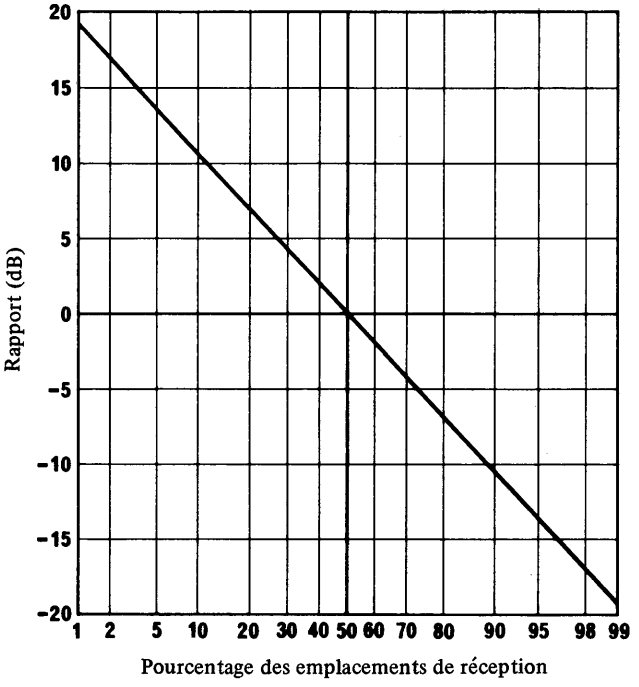



FIGURE 5 – *Rapport (dB) entre le champ pour un pourcentage quelconque des emplacements de réception et le champ pour 50% des emplacements de réception*

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

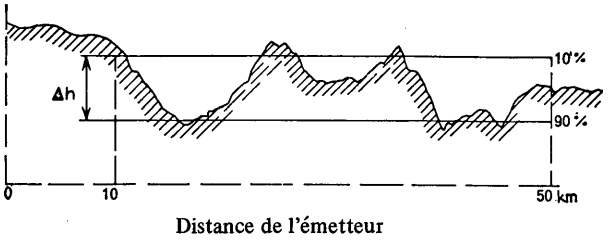



FIGURE 6 – *Définition du paramètre Δh*

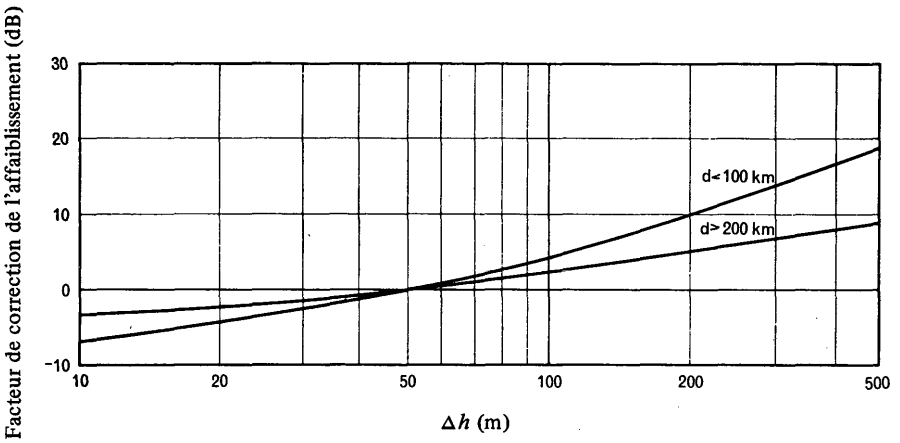



FIGURE 7 – *Facteur de correction de l'affaiblissement, en fonction de Δh, pour des fréquences de 80 à 250 MHz (Bandes II et III)*

(*d* est la distance de l'émetteur)

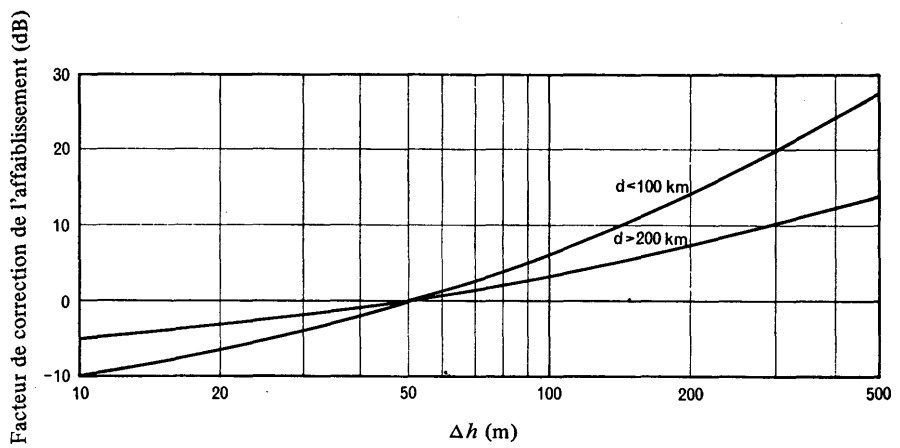



FIGURE 8 – *Facteur de correction de l'affaiblissement, en fonction de Δh, pour des fréquences de 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V)*

(*d* est la distance de l'émetteur)

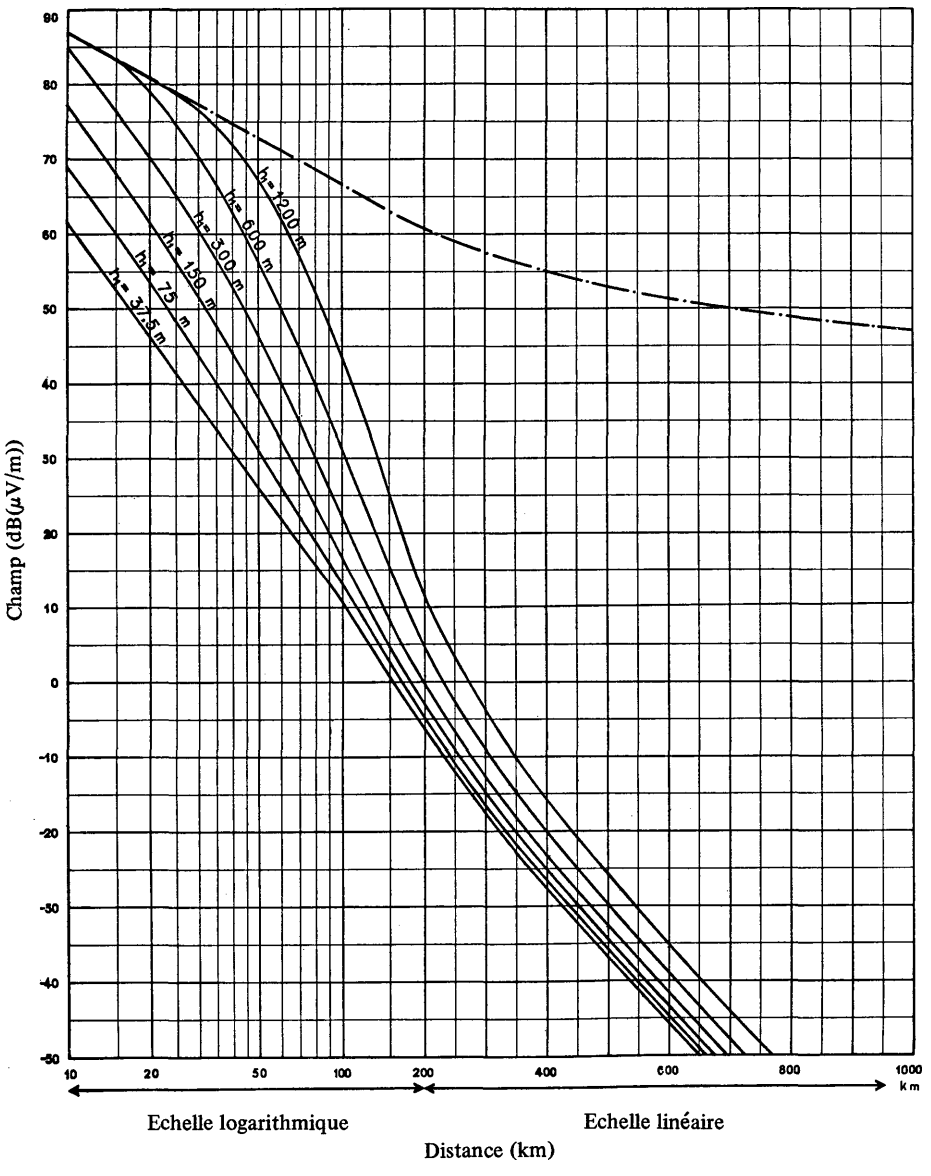



FIGURE 9 – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – Terre – 50 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2$ = 10 m – $\Delta h$ = 50 m

·—·—·—· Espace libre

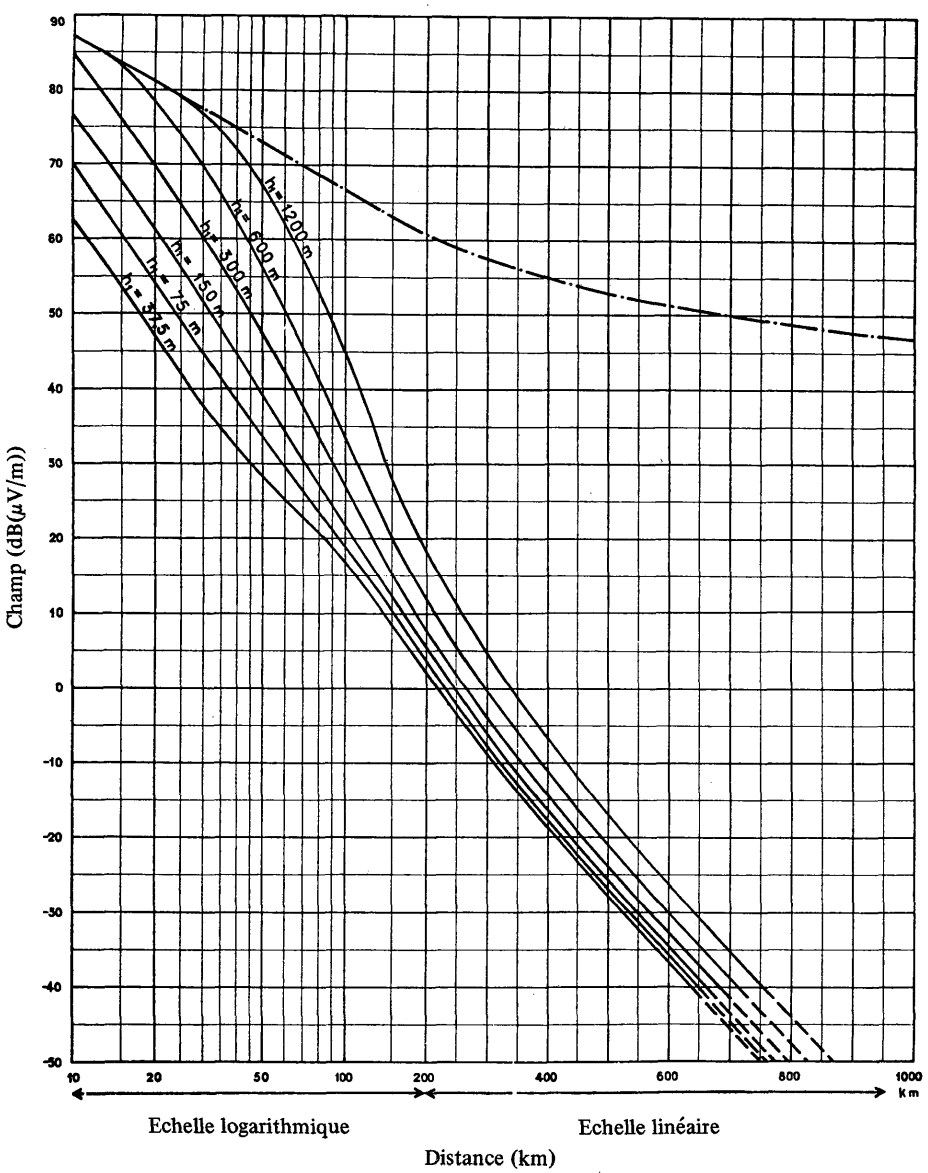



FIGURE 10 – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – Terre – 10 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2 = 10$ m – $\Delta h = 50$ m

·—·—·—· Espace libre

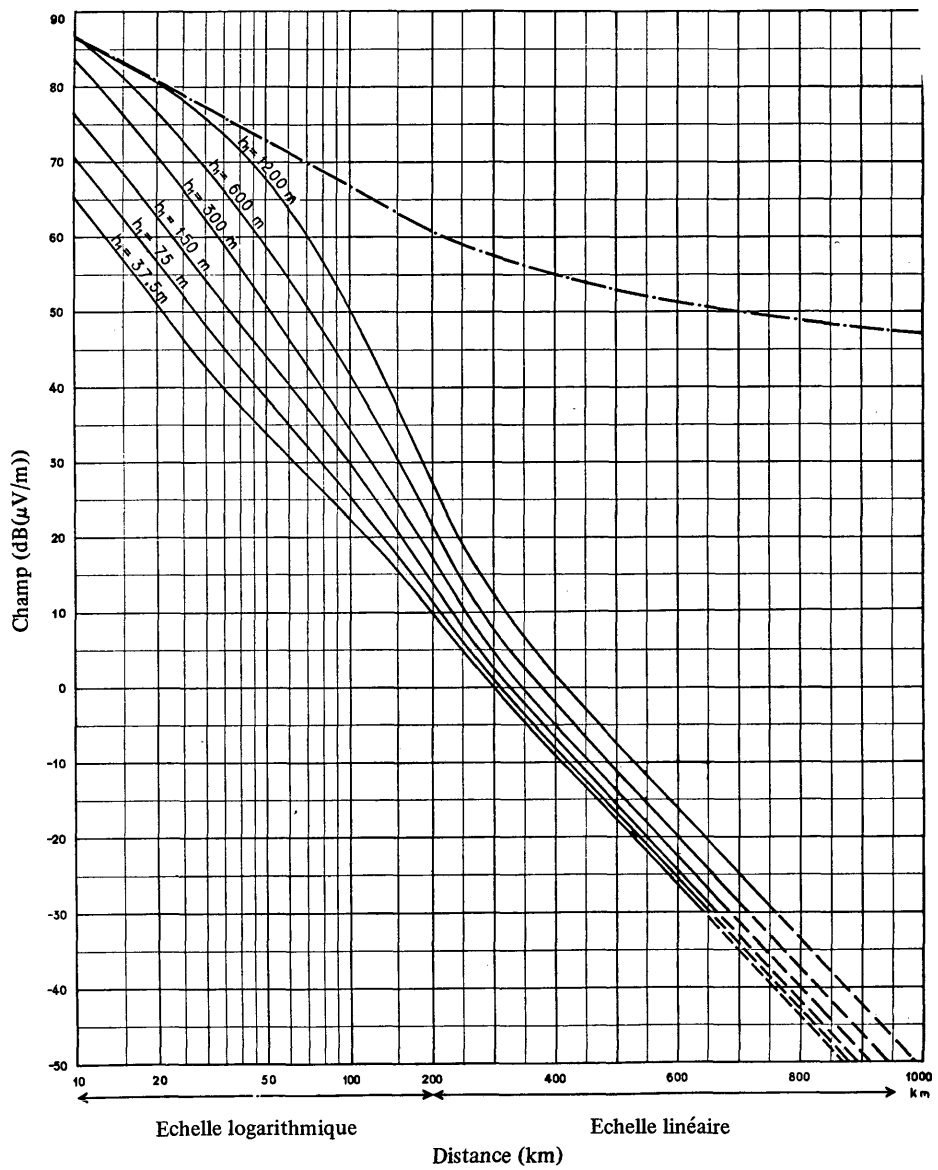



FIGURE 11 – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – Terre – 1 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2 = 10$ m – $\Delta h = 50$ m

·—·—·—· Espace libre

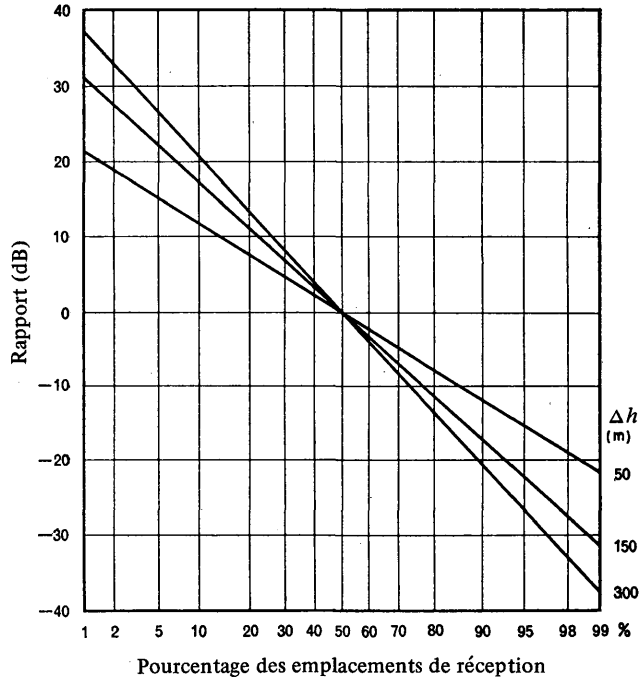



FIGURE 12 – *Rapport (dB) entre le champ pour un pourcentage quelconque des emplacements de réception et le champ pour 50% des emplacements de réception*

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

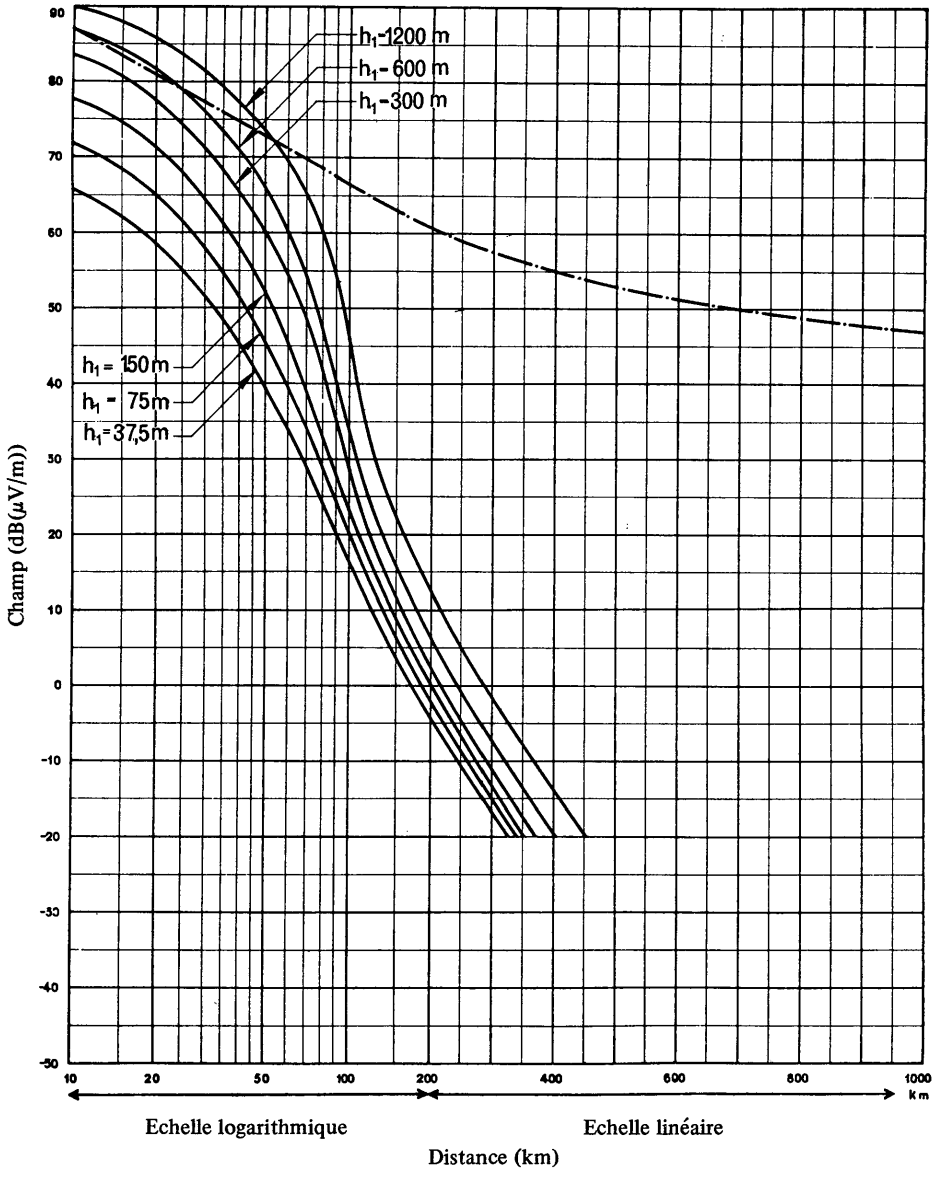



FIGURE 13 – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – mer du Nord et Méditerranée – 50 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2 = 10$ m

·—·—·—· Espace libre

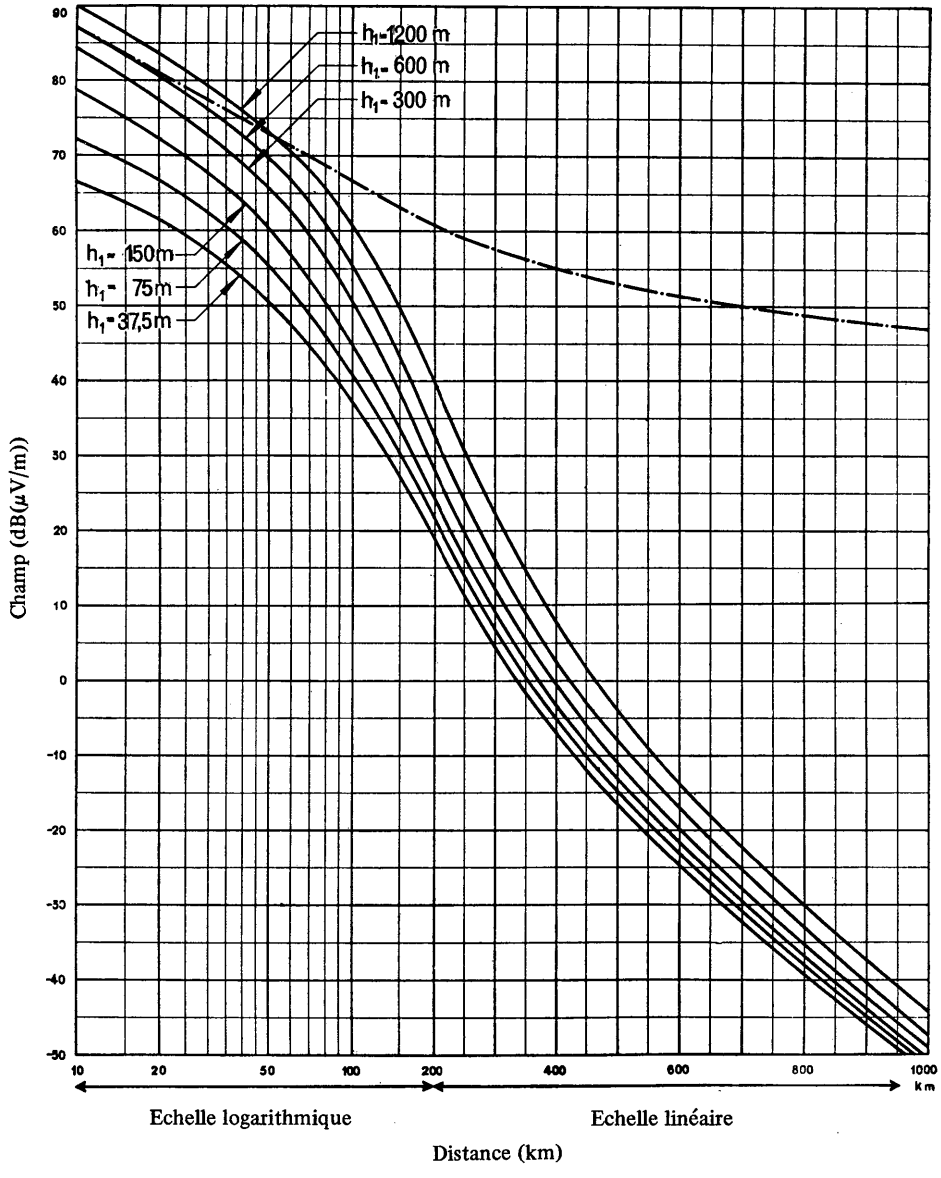



FIGURE 14*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – mer du Nord – 10 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2$ = 10 m

·—·—·—· Espace libre

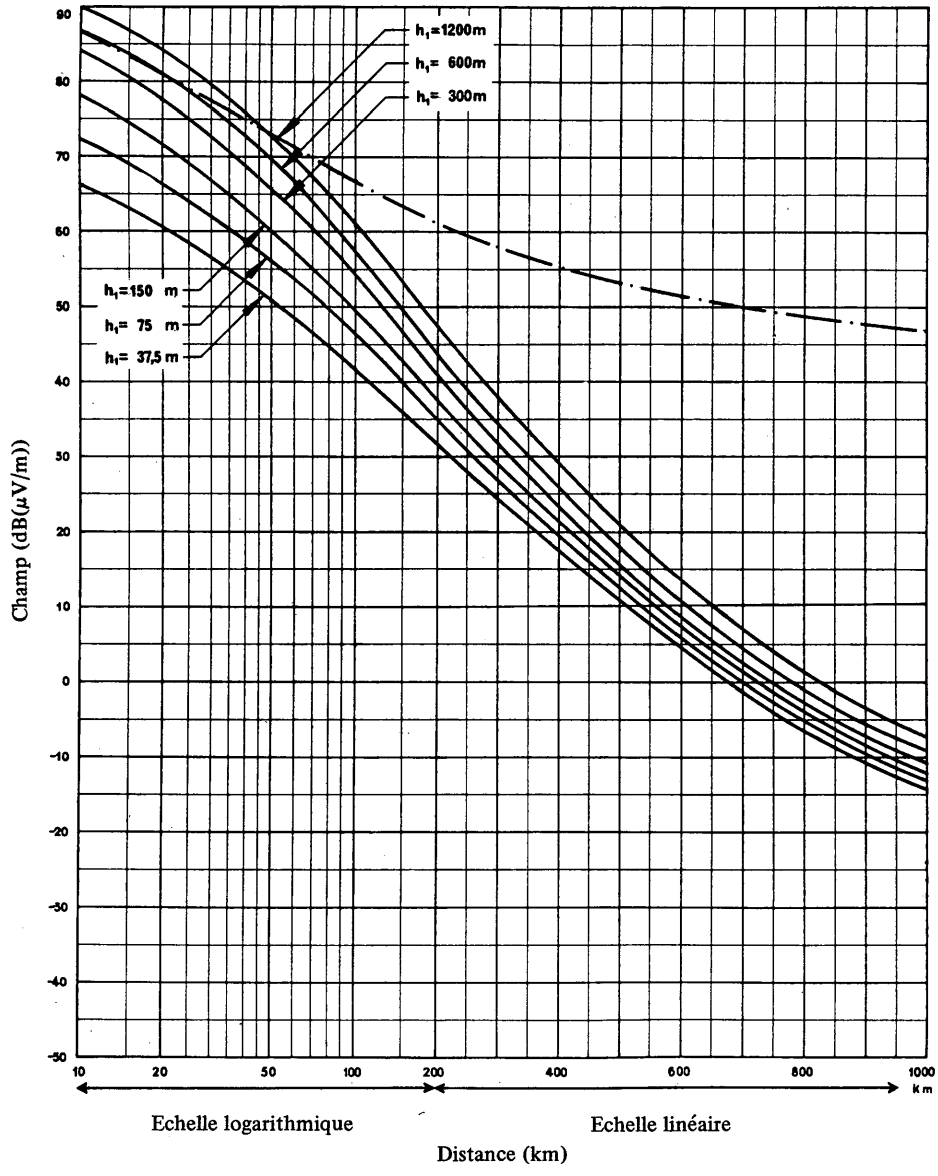



FIGURE 14*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

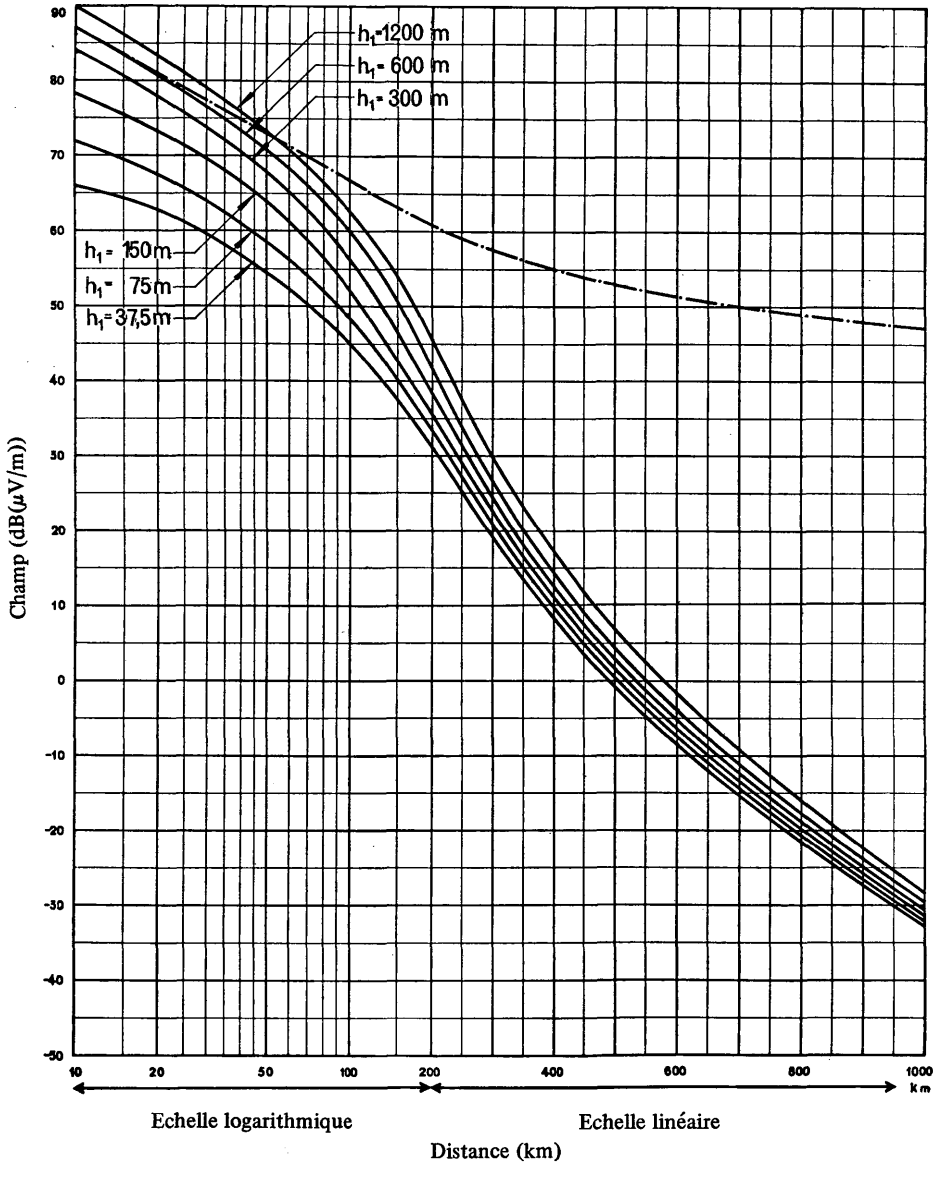



FIGURE 15*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*
Fréquences: 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V) – mer du Nord – 5 % du temps – 50 % des emplacements – $h_2$ = 10 m

.—.—.—. Espace libre

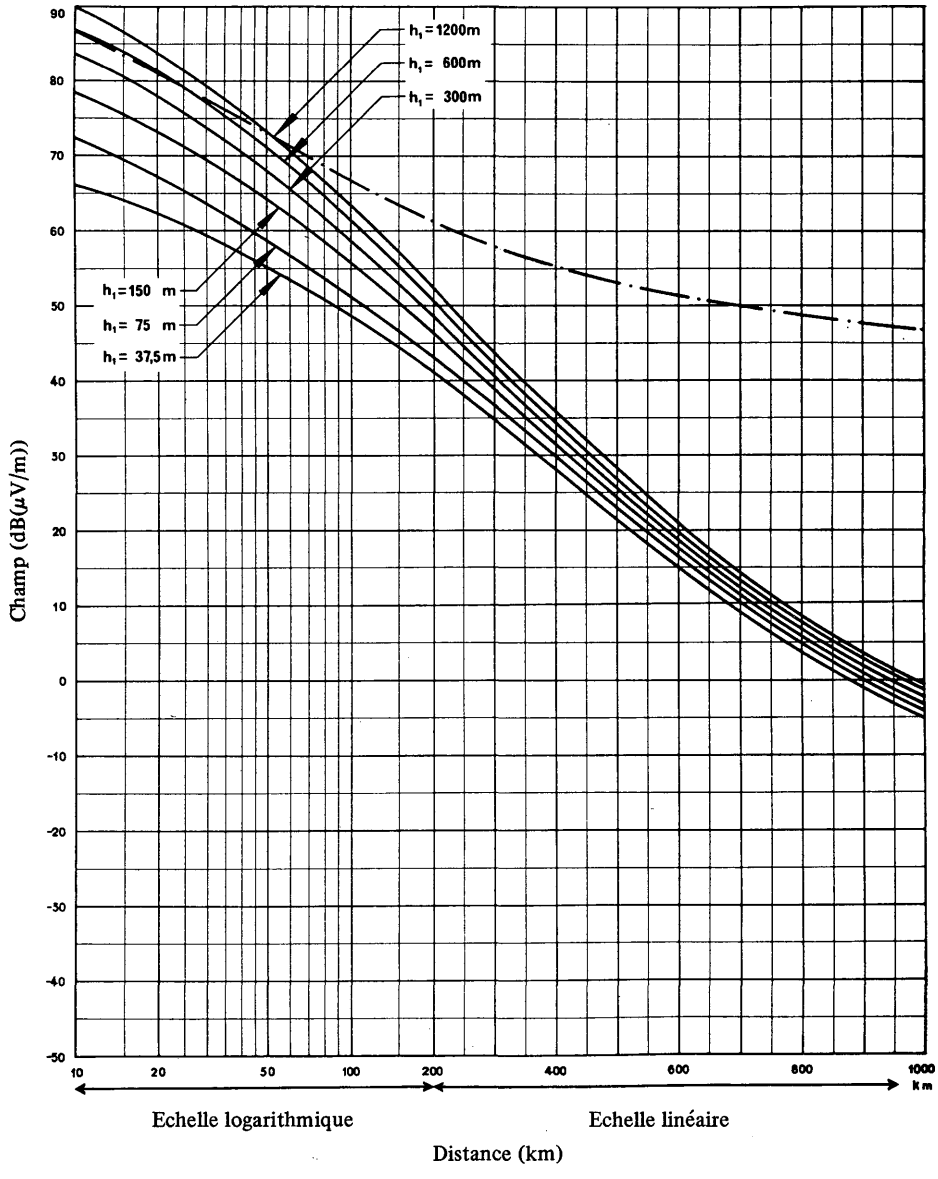



FIGURE 15*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

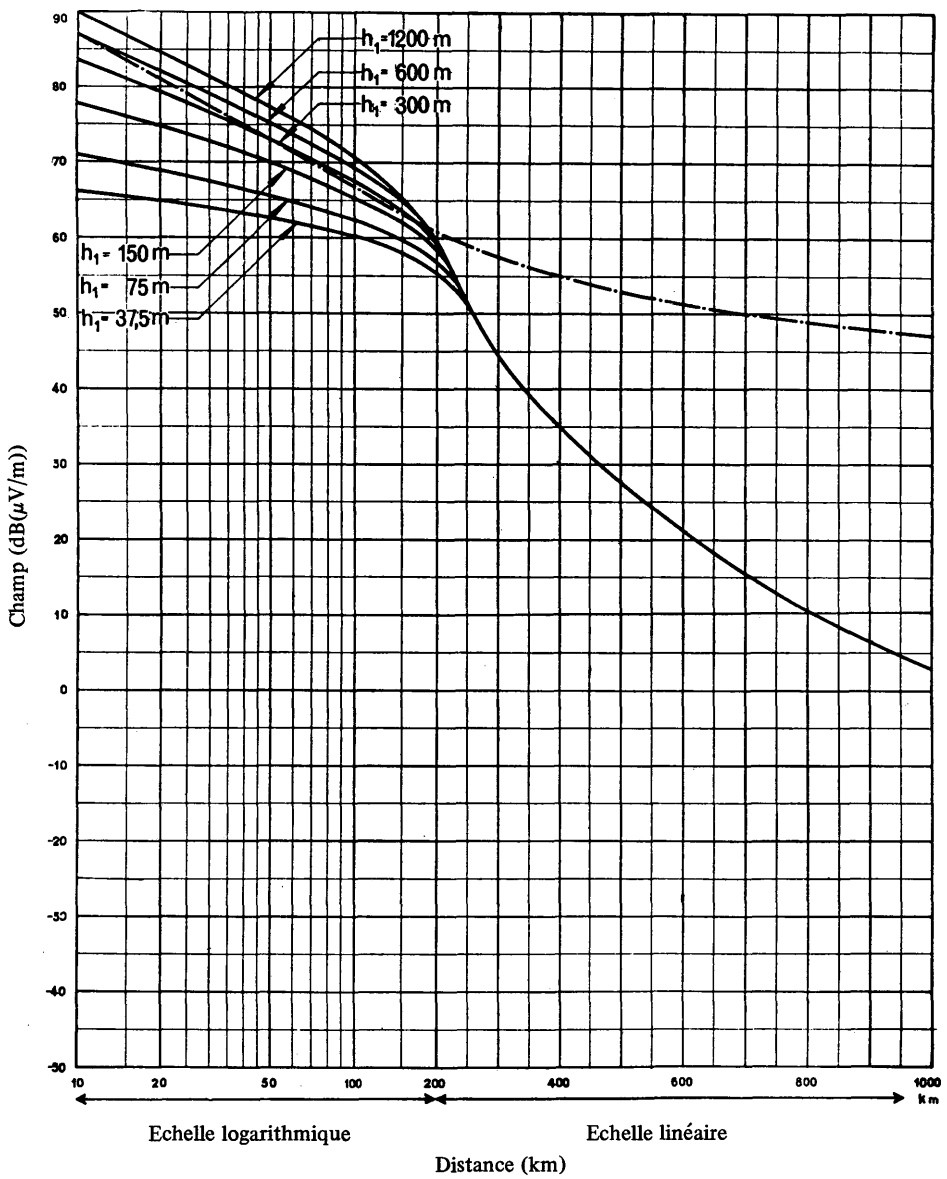



FIGURE 16*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

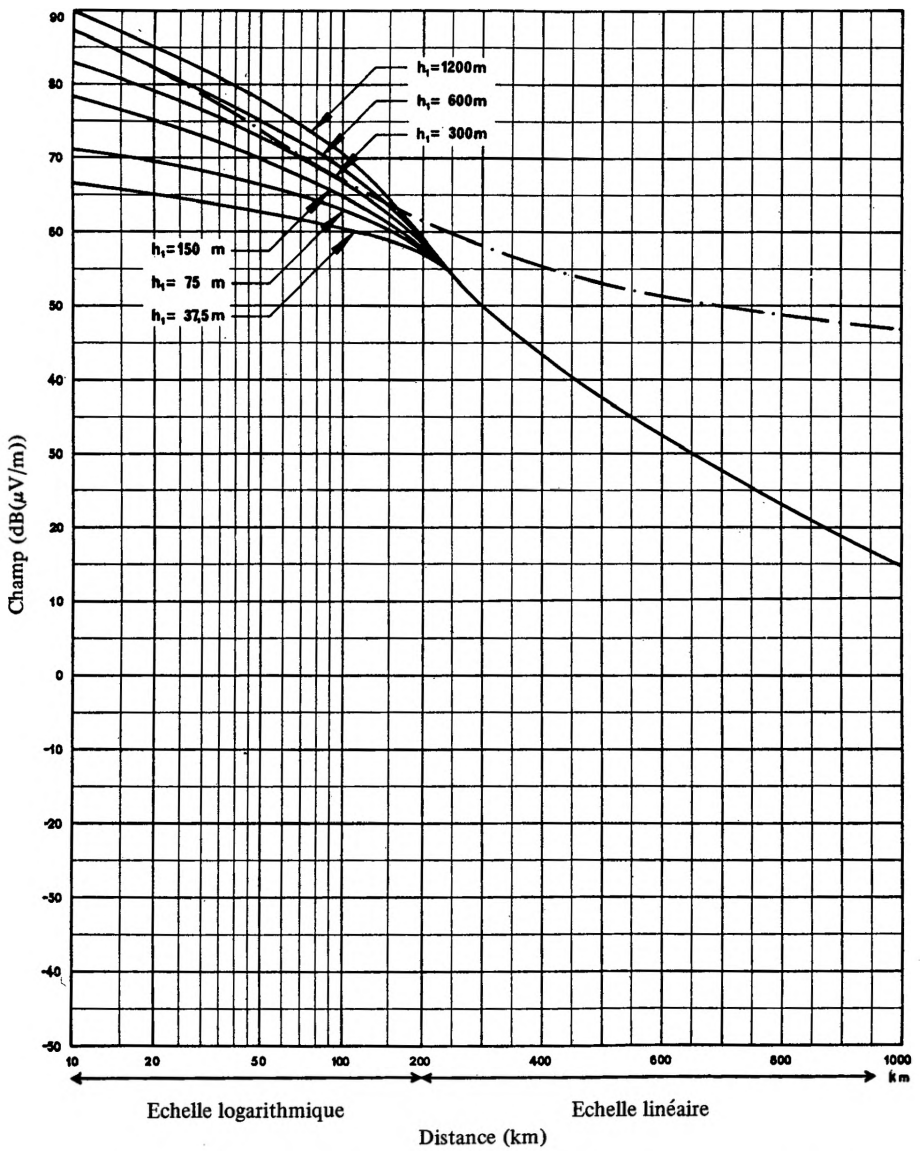



FIGURE 16*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

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

·—·—·—· Espace libre

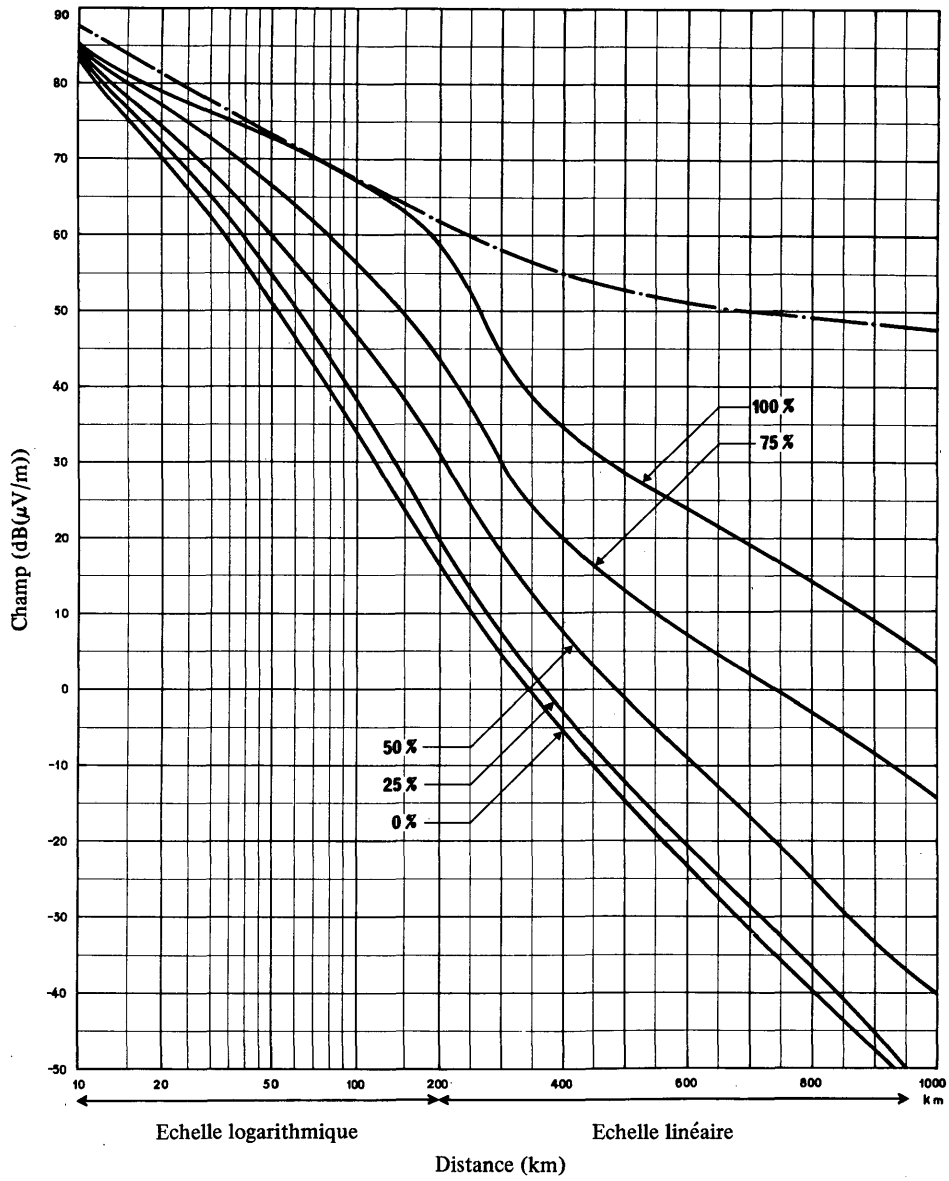



FIGURE 17*a* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

Fréquences: 450 à 1000 MHz (bandes IV et V). Trajet mixte terre-mer (région de la mer du Nord) pour le pourcentage indiqué de trajet maritime
1 % du temps; 50 % des emplacements; $h_2 = 10$ m; $h_1 = 300$ m

—·—·— Espace libre

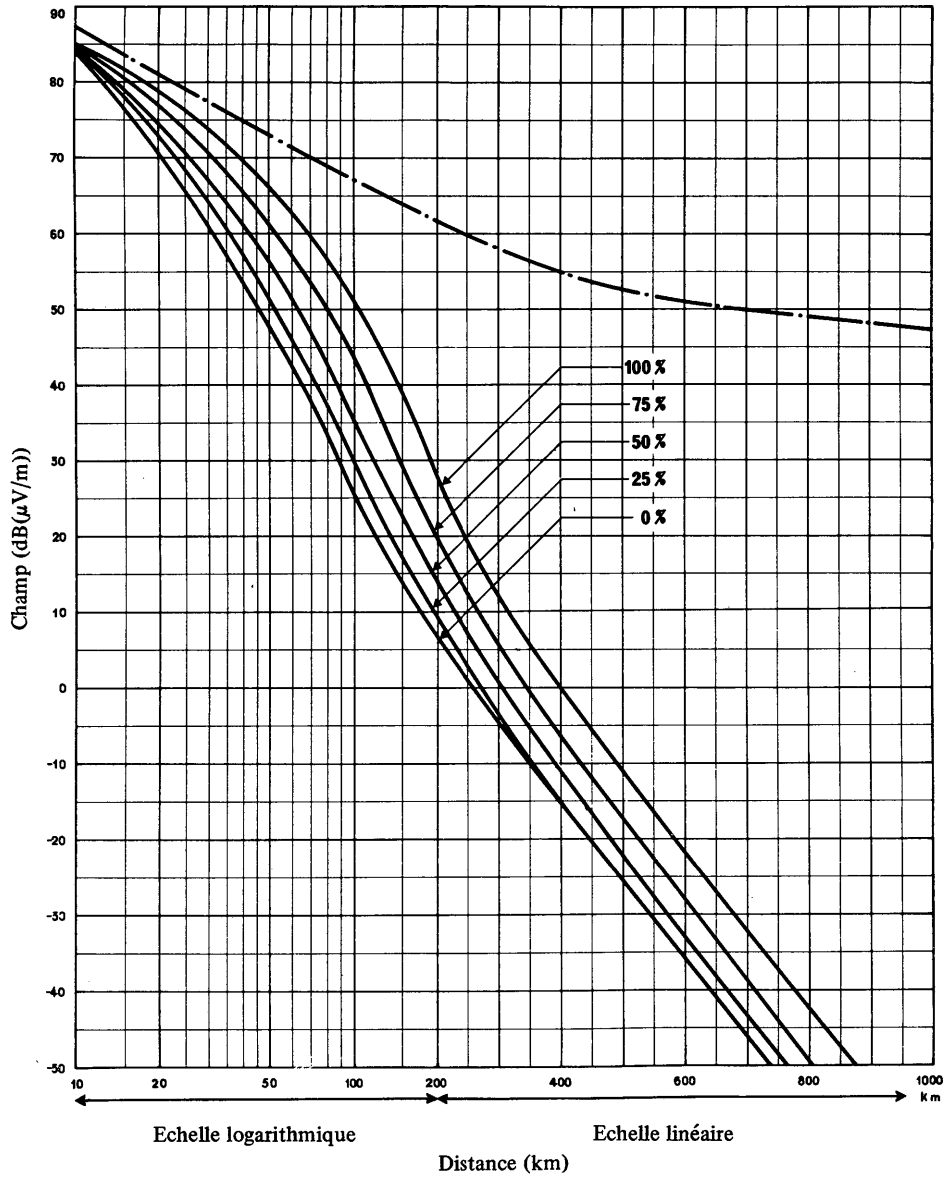



FIGURE 17*b* – *Champ (dB(μV/m)) pour 1 kW de puissance apparente rayonnée*

Fréquences: 450 à 1000 MHz (bandes IV et V). Trajet mixte terre-mer (région de la mer du Nord) pour le pourcentage indiqué de trajet maritime

10 % du temps; 50 % des emplacements; $h_2 = 10$ m; $h_1 = 300$ m

—·—·— Espace libre

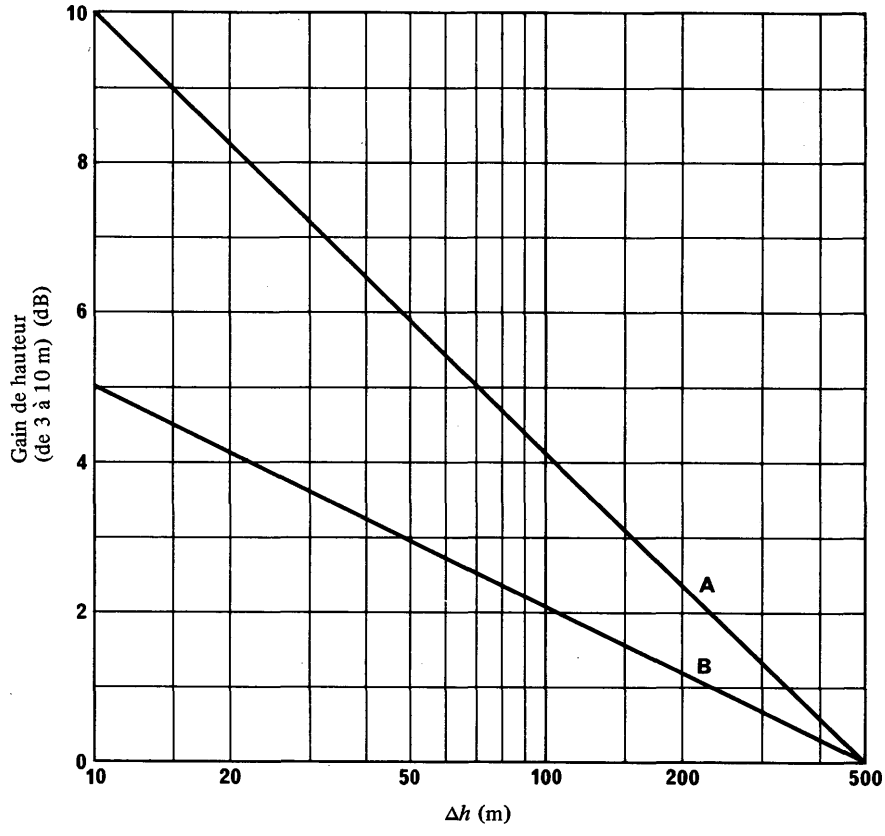



FIGURE 18 – *Facteur de gain de hauteur (de 3 à 10 m) en fonction de Δh pour des fréquences de 450 à 1000 MHz (Bandes IV et V); d est la distance à l'émetteur*

A: $d \leqslant 50$ km
B: $d \geqslant 100$ km

---

RAPPORT 239-4 *

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

(Programme d'études 7D/5)

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

### 1. Introduction

Le présent Rapport donne des indications sur la construction et l'usage des courbes de propagation de l'Avis 370-3; il comprend des résultats statistiques descriptifs relatifs aux phénomènes de dépolarisation. On y examine aussi l'influence des zones urbaines et de la végétation sur la propagation. Dans la dernière section, on propose des méthodes de calcul du champ au-dessus de trajets mixtes.

Aux pages 343 à 379 des Actes finals de la Conférence africaine de radiodiffusion à ondes métriques et décimétriques, Genève, 1963, on trouve des courbes de propagation pour la radiodiffusion sur le continent africain. Ces courbes ont été tracées compte tenu des différences climatiques prévues sur le continent africain. Grâce aux émetteurs qui fonctionnent dans les bandes de fréquences actuellement en service, on espère que les administrations des pays africains pourront fournir de nouvelles données, à comparer avec ces courbes.

Le Rapport 236-4, 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 228-2 étudie les mesures de champ pour le service de radiodiffusion; il en fait une analyse descriptive et montre

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 10 et 11.

comment on peut employer les courbes de propagation pour décrire des zones de service réelles. Pour la prévision de l'affaiblissement de transmission entre points fixes (médianes à long terme et variabilité dans le temps), on emploie habituellement d'autres méthodes de prévision. Un résumé de certaines d'entre melles, en cours d'étude par le Groupe de travail intérimaire créé aux termes de la Décision 4-1, a été publié précédemment [NBS, 1967].

## 2. Construction des courbes de propagation

Chacune des courbes de propagation de l'Avis 370-3 se compose de deux portions, l'une relative aux distances inférieures, l'autre aux distances supérieures à celle de l'horizon. Les modes de construction de ces deux portions sont différents. Les courbes rendent compte d'une grande masse de données, fournies par de nombreuses administrations.

### 2.1 *Distances supérieures à celle de l'horizon*

Les données à long terme relatives à ces distances ont été réparties entre ondes métriques et ondes décimétriques et, à l'échelon en dessous, entre trajets terrestres et trajets maritimes.

#### 2.1.1 *Ondes métriques*

Dans les Fig. 1 à 4c de l'Avis 370-3, les portions de courbe correspondant aux distances supérieures à celle de l'horizon résultent d'une très grande quantité de données, relevées sur de nombreux trajets terrestres et maritimes, au moyen d'antennes d'émission et de réception de diverses hauteurs. Dans un premier temps, on a rapporté ces données à une hauteur d'antenne d'émission de 300 m, en supposant que le champ créé à une distance $X$ (km) de l'émetteur, pour une hauteur d'antenne $h_1$ (m), est égal au 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 a ensuite appliqué la même formule pour dessiner la famille de courbes de l'Avis 370-3.

La propagation des ondes métriques de fréquence inférieure à 90 MHz environ aux distances supérieures à 500 km peut se faire par réflexion sur la couche ionisée sporadiquement de la région E pendant de petits pourcentages du temps. Le Volume VI du CCIR, en particulier le Rapport 259-4, traite de ces effets ionosphériques.

#### 2.1.2 *Ondes décimétriques*

La même méthode a été appliquée pour dessiner les portions de courbe correspondant à des distances supérieures à celle de l'horizon, dans les Fig. 9, 10, 11, 13, 14a et 14b de l'Avis 370-3.

Toutefois, pour des trajets maritimes et de petits pourcentages du temps, le champ est relativement indépendant de la hauteur de l'antenne d'émission. C'est pourquoi les courbes des Fig. 16a et 16b, qui correspondent à 1% du temps, n'ont pas été corrigées pour la hauteur d'antenne aux distances supérieures à celle de l'horizon. Les courbes à 5%, obtenues par interpolation entre les courbes à 1% et 10%, sont donc affectées de la moitié environ de la correction portant sur le gain dû à la hauteur.

Dans la région méditerranéenne, les mesures ont été faites du littoral, en des points dégagés d'où la vue s'étend directement sur la mer. Pour pouvoir en appliquer les résultats au calcul du brouillage subi dans un même canal dans des villes côtières – où le champ risque d'être moins intense qu'en des points dégagés – on les a corrigés de 7 dB environ par rapport aux valeurs mesurées. Il convient de noter que ces corrections sont à apporter à toutes les mesures faites en des points dégagés du littoral, dans les bandes des ondes métriques et décimétriques.

### 2.2 *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 370-3 représente les champs dépassés pendant 50% du temps pour les ondes métriques. Les courbes relatives aux distances inférieures à celle de l'horizon normal ont été obtenues par comparaison avec les courbes théoriques pour une terre unie. Ces courbes ont ensuite été raccordées de façon régulière avec les courbes de la famille correspondante relative aux distances supérieures à celle de l'horizon, comme il est décrit au paragraphe précédent. La Fig. 1 de l'Avis 370-3 contient donc des portions de courbe se rapportant à des distances inférieures à celle de l'horizon et à des distances supérieures, mais aussi des portions intermédiaires qui constituent un raccordement des deux premières.

Les Fig. 2a et 4a de l'Avis 370-3 représentent les champs en ondes métriques qui sont 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 courtes distances, de sorte que les courbes médianes de la Fig. 1 de l'Avis 370-3 peuvent servir de guide pour ces courtes distances et se raccorder avec les courbes correspondantes à 10% et 1% des autres figures.

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

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 370-3 pour des trajets terrestres et aux Fig. 13, 14a, 14b, 15a, 15b, 16a et 16b pour des trajets maritimes.

## 3. Autres données de mesure

### 3.1 *Régions de la mer du Nord et de la mer Baltique*

Des mesures faites dans les bandes IV et V sur des distances inférieures à 200 km dans la région de la mer du Nord montrent que, pendant 50% et 10% du temps, le champ peut dépasser de plusieurs décibels les valeurs déterminées d'après l'Avis 370-3, mais la concordance est meilleure pour les dépassements de 1% du temps.

Des mesures faites par l'OIRT sur une période de trois ans [Kühn et autres, 1969] confirment que les valeurs indiquées dans l'Avis 370-3 pour la région de la mer du Nord sont applicables aussi à la région de la mer Baltique. On a toutefois observé que, durant de petits pourcentages de temps, les valeurs mesurées du champ ont tendance à être légèrement plus élevées que les valeurs prévues.

Des mesures de champ faites en Suède pendant des périodes allant de 7 mois à 4 ans, en ondes métriques sur trois trajets et en ondes décimétriques sur trois trajets, dans la région de la mer Baltique ont donné, pour les trajets en ondes métriques, des résultats qui concordent avec les valeurs indiquées dans l'Avis 370-3 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, les champs mesurés qui sont dépassés pendant 1% et 10% du mois sont supérieurs de 30 à 40 dB aux niveaux estimés correspondants.

### 3.2 *Région de la mer Méditerranée*

Il convient de noter que dans la région de la Méditerranée, en particulier, le champ est considérablement plus intense durant les mois d'été [Fedi et autres, 1973] que durant les mois d'hiver. On a effectué en Italie [CCIR, 1974-78a] des mesures du champ en ondes métriques et décimétriques, sur deux trajets différents traversant la partie centrale de la mer Méditerranée. Ces mesures, qui se sont étendues sur une période de deux ans, mettaient en jeu plusieurs hauteurs de l'antenne de réception. On a comparé les résultats obtenus avec les calculs pour 1%, 5% et 10% du temps, en utilisant les figures de l'Avis 370-3 et en appliquant la formule du § 2.1.1 ci-dessus pour tenir compte de la hauteur de l'antenne d'émission, et une formule similaire, pour la hauteur de l'antenne de réception. On a constaté ainsi qu'il y a une bonne concordance, en ondes décimétriques, entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées; par contre, en ondes métriques, les valeurs mesurées dépassent de 3 à 14 dB les valeurs calculées.

### 3.3 *Autres régions*

Une importante conclusion à tirer des mesures faites par l'OIRT pendant une période de trois ans sur cinq trajets à 1100 MHz situés en Europe centrale est que la variation du champ est, pour plusieurs trajets, nettement supérieure à celle indiquée par l'Avis 370-3. Ces trajets étaient, par leur nature, particulièrement sensibles aux 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 les champs dépassés pendant 1% et 50% du temps est de l'ordre de 30 dB, à comparer avec la différence d'environ 18 dB que laisseraient prévoir les courbes de l'Avis 370-3, si on les retraçait pour une fréquence médiane d'environ 700 MHz (milieu des bandes IV et V).

Il ressort de certaines observations que, pour des pourcentages du temps petits mais non négligeables, 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 à une puissance rayonnée apparente de 1 kW sur une fréquence de 417 MHz a créé à une distance de 4740 km (à travers l'océan Atlantique) un champ de 0,15 μV/m mesuré pendant approximativement 2% de l'année [Misme, 1966].

## 4. Influence des irrégularités du terrain

Lorsque des emplacements de réception de radiodiffusion sont pris au hasard, sur des routes ou à leur voisinage et dans des vallées, les médianes de l'affaiblissement de transmission sont plus élevées que si l'on choisit très soigneusement ces emplacements. Tout d'abord, l'irrégularité du terrain à petite échelle augmente le champ escompté ou médian en supprimant l'effet annihilant d'une opposition de phase entre les ondes radioélectriques qui se propagent directement et celles qui sont réfléchies ou diffractées par le sol. Lorsque le terrain devient encore plus irrégulier et encombré d'obstacles, les signaux s'affaiblissent par effet d'écran, par absorption (y compris l'effet de la végétation) et par diffusion et divergence (défocalisation) des ondes diffractées. La convergence (focalisation) et la réflexion spéculaire jouent aussi un rôle dans ces phénomènes de propagation par trajets multiples, ainsi que le font la valeur moyenne, la turbulence et la stratification de l'indice de réfraction de 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 étendue, il faut s'attendre à un gain proportionnel à la hauteur d'antenne si cette hauteur reste petite, tandis que, si l'on élève une antenne de réception au-dessus des irrégularités et des accidents 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 122-3 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 par une réception en diversité: la discrimination par polarisation est meilleure en rase campagne et pour des signaux intenses que si le champ est faible, comme c'est le cas pour les transmissions en ondes décimétriques dans des zones où une antenne de réception est entourée d'obstacles.

La nature de l'emplacement de réception exerce encore d'autres effets importants sur les phénomènes de polarisation des ondes. Par exemple, des observations effectuées en République fédérale d'Allemagne en ondes métriques ont montré qu'aux emplacements masqués les réflexions ont peu d'effet sur les signaux à polarisation horizontale, tandis que sur les signaux à polarisation verticale elles agissent souvent assez pour dégrader beaucoup la qualité de la réception en modulation de fréquence.

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 $\Delta h$*

Le paramètre $\Delta h$ sert à caractériser le degré d'irrégularité du terrain. C'est la différence entre les altitudes dépassées sur 10% et 90% du trajet de propagation entre 10 et 50 km de distance de l'émetteur (voir la Fig. 6 de l'Avis 370-3). 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 $\Delta h = 50$ m. L'influence des irrégularités du terrain est d'autant plus forte que la fréquence est plus élevée, donc elle l'est plus pour les ondes décimétriques (bandes IV et V) que pour les ondes métriques (bandes I, II et III). C'est pourquoi, dans certains cas, on utilise le paramètre $\Delta h/\lambda$ (voir, par exemple, le § 4.2).

Si l'on imagine une expérience théorique dans laquelle on enregistrerait le champ à long terme en un grand nombre d'emplacements, la distribution des médianes dans le temps pour chacun de ces points se ramènerait alors à celle indiquée à la Fig. 5 de l'Avis 370-3 pour la propagation des ondes métriques sur un terrain vallonné typique caractérisé par $\Delta h = 50$ m.

On admet aussi que l'intervalle de variation de cette distribution en fonction du pourcentage des emplacements de réception – c'est-à-dire la pente de la courbe de distribution – est, en première approximation, indépendant du degré d'irrégularité du terrain en ondes métriques; cela étant, on peut considérer que la distribution représentée à la Fig. 5 de l'Avis 370-3 est applicable à la plupart des valeurs usuelles de $\Delta h$.

La Fig. 12 de l'Avis 370-3 indique des distributions typiques d'emplacements pour plusieurs valeurs de $\Delta h$, en ondes décimétriques; dans ce cas, l'intervalle de variation de la distribution ne peut pas être considéré comme indépendant de $\Delta h$.

En plus de l'augmentation de l'intervalle de variation en fonction du degré d'irrégularité du terrain, il faut signaler aussi que les champs moyens reçus sont d'autant plus faibles que le terrain est plus irrégulier, c'est-à-dire que $\Delta h$ est plus grand. Ici encore, 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. 7 et 8 de l'Avis 370-3 s'appliquent à des distances pouvant atteindre 100 km, dans les bandes III, IV et V [UER, 1965]. Des mesures faites par l'OIRT [Kühn, 1968] indiquent qu'il faut utiliser le même facteur de correction pour la bande II que pour la bande III.

Dans ce qui précède, il est entendu que le facteur de correction de l'affaiblissement doit être retranché du champ pour la valeur requise de $\Delta h$. Les Fig. 7 et 8 de l'Avis 370-3 donnent les valeurs de ce facteur pour des distances supérieures à 200 km.

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

Des études récentes ont montré que le paramètre $\Delta h$ ne suffit pas à lui seul pour déterminer 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 approximativement caractérisé par $\Delta h \approx 50$ m, l'estimation du champ médian peut être entachée d'une erreur supérieure à 20 dB. En général, cependant, cette erreur ne dépasse pas 10 dB; elle a tendance à être plus petite dans la bande des ondes métriques que dans celle des ondes 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 $\Delta h$.

4.1.1 Méthode mise au point en République fédérale d'Allemagne, dans laquelle la détermination du paramètre dépend dans une large mesure non seulement de la moyenne quadratique de $\Delta h$, mais également de la pente moyenne du terrain.

4.1.2 Méthode mise au point en République Populaire de Pologne, selon une variante de la méthode TASO [LaGrone, 1960]; dans cette méthode, la valeur du paramètre dépend de $\Delta h$ et de la longueur d'onde moyenne des ondulations du terrain.

4.1.3 Méthode mise au point au Royaume-Uni [UER, 1965], dans laquelle on utilise des paramètres qui dépendent de $\Delta h$ et de la pente moyenne du terrain. Une méthode analogue a également été mise au point au Japon pour déterminer les champs [Okumura et autres, 1968].

4.1.4 Les méthodes d'évaluation susmentionnées sont toutes fondées soit sur les corrections du champ calculé pour la propagation au-dessus d'une terre sphérique uniforme, soit sur l'hypothèse selon laquelle il existe des obstacles bien définis provoquant des diffractions sur le trajet de transmission. Toutefois, dans une autre méthode récemment mise au point au Japon [Okumura et autres, 1968], le champ en espace libre est pris comme norme initiale de référence pour la propagation au-dessus de n'importe quelle sorte de terrain.

## 4.2 *Variabilité d'un trajet à un autre*

Une étude récente de données relatives à des systèmes de radiodiffusion et des systèmes mobiles terrestres (de 20 MHz à 10 GHz), effectuée aux Etats-Unis d'Amérique [Longley, 1976], a montré la grande variabilité des données à laquelle on peut s'attendre en passant d'un trajet à un autre de même longueur. Cette variabilité s'accroît avec la fréquence radioélectrique et l'irrégularité du terrain; elle dépend en outre fortement de la présence de bâtiments et d'arbres au voisinage des extrémités des trajets. Toutefois, en rapportant à la longueur d'onde, $\lambda$, la caractéristique d'irrégularité du terrain, $\Delta h$, on peut calculer l'écart type $\sigma_L$ de la variabilité d'un trajet à un autre, de longueur à peu près égale, au moyen de l'une des deux expressions suivantes, pour $(\Delta h/\lambda) < 3000$:

$$\sigma_L = 6 + 0{,}69\,(\Delta h/\lambda)^{1/2} - 0{,}0063\,(\Delta h/\lambda) \quad \text{dB} \tag{1}$$

ou, pour $(\Delta h/\lambda) \geqslant 3000$:

$$\sigma_L = 25 \text{ dB} \tag{2}$$

A l'exception des données relevées au-dessus de 300 MHz dans une zone montagneuse accidentée, 90% de tous les écarts types observés sont égaux, à 2 dB près, aux valeurs calculées au moyen des formules (1) et (2).

On a comparé les formules (1) et (2) en effectuant une série de mesures indépendantes à 172 et 410 MHz, sur 130 trajets (dans une zone forestière plate de Floride, dans une zone forestière vallonnée de Californie et dans la zone aride et bouleversée des montagnes de l'Arizona), les hauteurs d'antenne étant égales ou inférieures à 1 m. Les résultats des formules (1) et (2) étaient les mêmes, à 1,5 dB près, que les écarts types observés pour des valeurs de $\Delta h/\lambda$ comprises entre 15 et 175.

## 4.3 *Méthodes informatiques*

Pour calculer le champ de façon très précise sur des trajets déterminés, on peut utiliser des programmes d'ordinateur. On trouvera, au § 5 du présent Rapport, une description des programmes mis au point à cet effet, ainsi que des références appropriées.

## 4.4 *Influence d'une modification de la hauteur de l'antenne de réception*

### 4.4.1 *Médianes du gain dû à la hauteur*

Les travaux faits par diverses administrations 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 valeurs que l'on peut utiliser sont données dans l'Avis 370-3.

De même, des mesures faites au Royaume-Uni révèlent que les composantes d'un signal à polarisations, l'une horizontale et l'autre verticale, présentent toutes deux, entre 3 m et 10 m au-dessus du sol, une variation du gain proportionnelle à la hauteur de l'antenne, mais qu'on observe peu de changement dans la composante verticale reçue lorsque l'antenne est à une hauteur de moins de 3 m.

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

### 4.4.2 *Rapport entre les champs mesurés dans une ville et dans ses environs*

D'après les données actuellement disponibles, si les antennes de réception sont suffisamment élevées au-dessus du niveau des toits environnants, le champ reçu est pratiquement du niveau indiqué par les courbes de l'Avis 370-3.

L'expérience a montré que, dans les bandes I et II, il n'existe pas une grande différence entre les champs mesurés à une hauteur de 10 m dans les zones rurales et dans les zones urbaines. Dans la bande III, des travaux faits en République Populaire de Pologne ont montré que les champs observés à une hauteur de 10 m dans des zones suburbaines sont à peu près du niveau de ceux que l'on obtient dans des régions rurales équivalentes et que les valeurs de l'affaiblissement maximal au centre d'une zone urbaine sont les suivantes: dans une zone urbaine de 400 000 habitants, 16 dB à 10 m et 6 dB à 16 m (niveau moyen des toits), et dans une zone urbaine de 80 000 habitants [TASO, 1959], 12 dB à 10 m. Dans

les zones de construction dense, les champs reçus peuvent être réduits de 6 à 16 dB selon le caractère des bâtiments. On a essayé à la suite de mesures plus approfondies faites, en bande IV, en République Populaire de Pologne [Ogulewicz, 1971] d'établir une relation entre l'affaiblissement dans les zones urbaines et un facteur de densité des constructions. Ces mesures ont été effectuées pour une zone se trouvant en limite du service et dans laquelle l'angle d'arrivée du signal était petit; elles ont montré que l'affaiblissement peut varier de 3 dB pour une petite valeur du facteur de densité des constructions à 28 dB pour une grande valeur de ce facteur. Cependant, dans les zones de très grande densité de construction, on doit tenir compte du gain dû à la hauteur au-dessus de 10 m (niveau de référence), la valeur moyenne de ce gain étant, dans les grandes villes, de 12 dB lorsqu'on double la hauteur de l'antenne de réception. En ce qui concerne les ondes décimétriques, des travaux effectués récemment au Royaume-Uni ont révélé un affaiblissement médian de 9 dB pour les zones urbaines, dans le sud-est de l'Angleterre. Des expériences effectuées en Italie dans les bandes des ondes métriques et décimétriques dans des zones à forte densité de construction ont montré que l'affaiblissement linéique supplémentaire dépend principalement de la densité de construction et de la hauteur des bâtiments, de l'angle d'arrivée des ondes à l'antenne de réception et de l'orientation de la rue par rapport à la direction de l'émetteur vu de l'emplacement de réception.

Il y aurait lieu de prélever un échantillonnage statistique plus étendu pour caractériser chaque type d'agglomération urbaine.

### 4.4.3 *Antennes sur le toit et antennes intérieures*

On a comparé le signal reçu par des antennes installées sur les toits et à l'intérieur des habitations de la ville de New York, tant du point de vue du champ que de l'appréciation subjective de la qualité de l'image de télévision. Les distributions de l'affaiblissement de transmission d'un point à un autre étaient log-normales, avec des écarts types de 16 et 14 dB pour les mesures faites respectivement sur les toits et à l'intérieur des habitations. Dans ces distributions, les 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) au rez-de-chaussée et dans les combles d'immeubles suburbains à deux niveaux ont mis en évidence un affaiblissement moyen de 19 dB et 10 dB respectivement, par comparaison avec des mesures faites à une hauteur de 10 m dans la rue, à l'extérieur de ces immeubles [Sofaer et Bell, 1966].

## 4.5 *Phénomènes de dégradation de la polarisation*

On considère ici le degré de transpolarisation, qui est le rapport de l'amplitude de la composante à polarisation orthogonale, produite par un certain mécanisme de propagation, à l'amplitude de l'onde initiale à polarisation rectiligne (monoplanaire).

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

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

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

La dernière ligne du Tableau I montre que dans une zone boisée la polarisation se dégrade bien plus que dans d'autres régions où l'affaiblissement de propagation est pourtant le même.

Des mesures faites près de Heidelberg, en République fédérale d'Allemagne, à 520 et 700 MHz, ont révélé que l'influence de la fréquence et de la densité de construction est négligeable. Le Tableau II montre quelle est l'influence des variations du paramètre $\Delta h$.

TABLEAU I

| Type de terrain | Médiane de l'affaiblissement de propagation par rapport à l'espace libre (dB) | Rapport de découplage dépassé 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 |

TABLEAU II

| Type de terrain | $\Delta h$ (m) | Rapport de découplage dépassé en 90 % des emplacements (dB) | Rapport de découplage dépassé en 50 % des emplacements (dB) |
|---|---|---|---|
| Plat | 10 | 20 | 30 |
| Vallonné | 50 | 14 | 27 |
| Montagneux | 200 | 0 | 16 |

### 4.6 *Affaiblissement dû à la végétation*

L'affaiblissement au-dessus d'un terrain boisé ou à couverture végétale varie avec la fréquence. Dans la pratique, on a observé cependant que l'affaiblissement dû à la végétation ne dépasse pas quelque 30 dB à des fréquences inférieures à 500 MHz environ [Ogulewicz, 1972].

Des mesures [Sofaer et Bell, 1966] effectuées au-delà de bois composés d'espèces feuillues, en été et en hiver, montrent que, si l'affaiblissement dû au feuillage n'est pas négligeable en ondes décimétriques, il est cependant sensiblement moindre que celui qui est dû à des arbres dénudés.

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

La propagation à travers des zones forestières est traitée plus en détail dans le Rapport 236-4.

### 4.7 *Affaiblissement dû aux bâtiments*

L'affaiblissement dû aux bâtiments varie lui aussi avec la fréquence. Une étude effectuée au Japon [Kinase, 1969] a fourni des valeurs de l'affaiblissement au-delà de bâtiments, en fonction de la fréquence, de la hauteur des bâtiments, de leur dimension dans la direction de la propagation et de l'angle d'arrivée. Cette étude fait intervenir un paramètre qui tient compte des effets produits par un chaos d'obstacles autour du point de réception. Cela s'ajoute aux corrections pour accidents de terrain. Les valeurs ainsi calculées concordent bien avec des valeurs mesurées à 100, 200 et 700 MHz.

Des mesures faites au Royaume-Uni [Sofaer et Bell, 1966] ont fourni des valeurs de l'affaiblissement subi au-delà de bâtiments de divers types, en ondes décimétriques (600 MHz); ces valeurs peuvent atteindre 30 dB.

Des mesures faites en République fédérale d'Allemagne ont montré qu'à 190 MHz, sur des trajets à visibilité directe, le champ en polarisation verticale est inférieur de 3 dB à ce qu'il est en polarisation horizontale;

cette différence se trouve portée à 4,5 dB en des emplacements masqués. D'autres mesures effectuées en des emplacements masqués, à 97 MHz, ont fait apparaître une différence de 5 dB avec un écart de ± 5,2 dB. A 500 MHz, les différences de propagation entre polarisations sont beaucoup moins marquées, les valeurs correspondantes variant entre 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. Trajet mixte terrestre-maritime

S'il s'agit d'un trajet mixte terrestre-maritime, il faut évaluer l'influence de cette mixité sur le signal reçu. Aux fins générales de planification, on peut procéder à une interpolation adéquate entre les courbes d'affaiblissement relatives aux trajets entièrement terrestres et les courbes relatives aux trajets entièrement maritimes (voir l'Avis 370-3) (méthode A).

Lorsqu'on peut évaluer la moyenne des angles de site de l'horizon vu des antennes de réception dans la zone de réception, on peut employer une méthode mise au point en Suède [Rue, 1966] (méthode B).

Dans des cas particuliers, on a pu prévoir sur ordinateur – cas par cas – l'affaiblissement sur des trajets mixtes, en introduisant dans les programmes les caractéristiques du profil terre-mer entre l'émetteur et le point de réception [Causebrook et King, 1974] (méthode C).

On peut aussi recourir à d'autres méthodes informatiques [Longley et Rice, 1968; Causebrook et Lee; Causebrook et autres, 1969] pour évaluer le champ reçu sur des trajets mixtes. *

### 5.1 *Méthode A – Interpolation entre trajets entièrement terrestres et trajets entièrement maritimes*

L'interpolation entre les courbes pour trajets entièrement terrestres et pour trajets entièrement maritimes de l'Avis 370-3 peut s'effectuer comme suit:

Soit $A$: rapport de la longueur de la portion maritime à la longueur totale du trajet,

$E_S$: médiane du champ (dB(μV/m)) sur un trajet maritime de longueur égale à celle du trajet mixte,

$E_L$: médiane du champ (dB(μV/m)) sur un trajet terrestre de longueur égale à celle du trajet mixte,

$E'_S$: champ (dB(μV/m)) dépassé pendant $X$% du temps sur un trajet maritime de longueur égale à celle du trajet mixte,

$E'_L$: champ (dB(μV/m)) dépassé pendant $X$% du temps sur un trajet terrestre de longueur égale à celle du trajet mixte,

$E_M$: médiane du champ (dB(μV/m)) sur le trajet mixte,

$E'_M$: champ (dB(μV/m)) dépassé pendant $X$% du temps sur le trajet mixte.

On peut évaluer $E_M$ et $E'_M$ par les formules:

$$E_M = A\,E_S + (1 - A)\,E_L \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{3}$$

$$e = \sqrt{A^2\,(E'_S - E_S)^2 + (1 - A)^2\,(E'_L - E_L)^2} \tag{4}$$

$$E'_M = E_M + e \qquad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \tag{5}$$

qui sont applicables si $0 \leqslant X \leqslant 50\%$

Les Fig. 17a et 17b de l'Avis 370-3 montrent les résultats que donne cette méthode d'interpolation quand on l'applique à des trajets mixtes dans la région de la mer du Nord, respectivement pour 1% et 10% du temps.

Cependant, comme les courbes de l'Avis 370-3 ne font apparaître de différences entre la terre et la mer que pour de petits pourcentages du temps et à condition que l'onde se propage autrement qu'au sol, la méthode d'interpolation ne peut être appliquée dans le cas de distances bien supérieures à celle de l'horizon. Les divers facteurs de correction indiqués dans le présent Rapport conviennent à la prévision du champ sur des trajets mixtes.

### 5.2 *Méthode B*

Comme la méthode A, la méthode B [Rue, 1976], associée aux courbes de propagation de l'Avis 370-3, qui sont relatives à des trajets entièrement terrestres ou entièrement maritimes, est applicable à l'évaluation des champs sur un trajet mixte, à condition qu'on puisse calculer la moyenne de l'angle de site de l'horizon vu des antennes de réception dans la zone de réception.

### 5.3 *Méthode C*

La méthode C, qui a été mise au point au Royaume-Uni [Causebrook et King, 1974] et est entièrement informatique, a pour objet de calculer cas par cas des profils de trajet, de quelque type qu'ils soient. Fondée sur la théorie de la diffraction et sur une analyse statistique des mesures, elle met en jeu un facteur de courbure équivalente de la Terre, que l'on fait varier avec le pourcentage du temps considéré, et elle tient compte des phénomènes de propagation par conduits qui ont lieu pendant de petits pourcentages du temps dans la bande des ondes décimétriques.

* Ces méthodes informatiques, ainsi que la méthode C, s'appliquent aussi à des trajets autres que mixtes.

5.4 *Autres méthodes informatiques*

C'est la méthode C qui fournit en général les prévisions les plus précises; il existe cependant des méthodes informatiques plus simples [Longley et Rice, 1968; Causebrook et Lee; Causebrook et autres, 1969], capables de donner des résultats satisfaisants dans de nombreuses applications. Les méthodes informatiques peuvent toutes s'appliquer à n'importe quel type de trajet.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


CAUSEBROOK, J. H. et LEE, R. W. Calculation of the field strength required for a television service in the presence of co-channel interfering signals. Partie 1, BBC Research Department, Rapport N° Ra-12/1.

CAUSEBROOK, J. H., DAVIS, B. et SANDELL R. S. [1969] The prediction of co-channel interference to television broadcasting services to the frequency range 470-960 MHz. BBC Research Department, Rapport N° 1969/33.

CAUSEBROOK, J. H. et KING, R. W [1974] Computer programs for UHF co-channel interference prediction using a terrain data bank. BBC Research Department, Rapport N° 1974/6.

FEDI, F., RICCARDI, M. et RODINO DI MIGLIONE, F. [novembre 1973] Propagation des ondes décimétriques à grande distance sur la Méditerranée. *Alta Frequenza,* édition anglaise, N° **6**, Vol. 42, 11.

KINASE, A. [mars 1969] Influence of terrain irregularities and environmental clutter surroundings on the propagation of broadcasting waves in the UHF and VHF bands. *NHK Technical Monograph*, 14, Japon.

KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [décembre 1961 et mars 1962] Ausbreitungsmessungen bei 480 MHz und 780 MHz im Gebirge der Niederen Tatra (Mesures de propagation à 480 et 780 MHz dans les montagnes de Bas-Tatras (République Socialiste Tchécoslovaque)). *Techn. Mitteilungen BRF*, Vol. 5, **4**, 174 (décembre 1961) et *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, **1**, 18 (mars 1962).

KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [1962] Ausbreitung von Dezimeterwellen bei horizontaler und vertikaler Polarisation und Höhenabhängigkeit der Feldstärke im Gebirge (Propagation des ondes décimétriques en polarisations horizontale et verticale, et variation du champ en fonction de la hauteur du terrain montagneux). *Techn. Mitteilungen RFZ,* Vol. 6, **4**, 162-166.

KÜHN, U. [1968] Die Geländedämpfung im UKW-Rundfunkband (87,5-100 MHz) (Affaiblissement dû au terrain en radiodiffusion à ondes métriques (87,5 à 100 MHz). *Nachrichtentechnik*, 18, **18**, 414-415.

KÜHN, U., TROMMER, H. et OGULEWICZ, S. [1969] Mehrjährige Ausbreitungsuntersuchungen bei 495 MHz auf der Seestrecke Jaroslawiec-Sassnitz (Ostsee) (Etudes pluriannuelles de la propagation à 495 MHz sur le trajet maritime Jaroslawiec-Sassnitz (Baltique)). *Techn. Mitteilungen RFZ,* Vol. 13, **3**, 128-133.

LAGRONE, A. H. [juin 1960] Forecasting television service fields. *Proc. IRE,* Vol. 48, 6.

LONGLEY, A. G. et RICE, P. L [1968] Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method. AD 676874 NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

LONGLEY, A. G. [mai 1976] Location variability of transmission loss ... land mobile and broadcast systems. PB 254472 NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

MISME, P. [1966] Propagation transhorizon à très grandes distances au-dessus de l'Atlantique intertropical. *Ann. des télécomm.*

NBS [1967] National Bureau of Standards, Note technique N° 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

OGULEWICZ, S. [1971] Propagation en ondes décimétriques dans les zones urbaines. *Prace Instytutu Łączności*, Vol. 18, **4** (64) (en polonais) – Un résumé de cet article a été présenté dans le Doc. CCIR 5/81 (République Populaire de Pologne) 1970-74.

OGULEWICZ, S. [1972] L'influence de la végétation sur l'affaiblissement en bande IV (en polonais). Rapport 102-01-08-01, *Institut Łączności*, Varsovie.

OKUMURA, Y. et autres [septembre-octobre 1968] Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Rev. of Electrical Communication Laboratory*, Vol. 16, 9-10.

RUE, O. [1976] Propagation over mixed land-sea paths on VHF and UHF, *TELE*, Suède (édition anglaise), **2**, 25-29.

SOFAER, E. ét Bell, C. B. [juillet 1966] Factors affecting the propagation and reception of broadcasting signals in the UHF bands. *Proc. IEE*, Vol. 113, 7.

TASO [1959] Report of Television Allocations Study Organization to the Federal Communications Commission.


*Document du CCIR*

[1974-78]: 5/74 (Italie).

## BIBLIOGRAPHIE


CARLSSON, G., WESTER, L. Å. et LINDQUIST, R. [mai 1972] Influence de la ligne côtière sur la propagation de l'onde de sol HF (en suédois). Conférence radioscientifique, Lund, Suède.

MILLINGTON, G. [1949] *Proc. IEE,* Partie III, 53-64.

MILLINGTON, G. [1950] *Proc. IEE,* Partie III, 209-222.


*Documents du CCIR*

[1974-78]: **a.** 5/17 (Suède); **b.** 5/18 (Suède); **c.** 5/66 (U.R.S.S.).

AVIS 528 *

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

(Programme d'études 7F-1/5)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que l'on a besoin de donner des directives aux ingénieurs pour la planification des services mobiles aéronautiques dans les bandes des ondes métriques, décimétriques et centimétriques;

*b)* que les courbes figurant dans l'Annexe II sont fondées sur un grand nombre de données expérimentales (voir l'Annexe I),

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que l'on adopte les courbes de l'Annexe II ** pour déterminer les valeurs médianes à long terme *** de l'affaiblissement de transmission pour les hauteurs d'antenne (des stations au sol ou des stations d'aéronef) que l'on peut rencontrer dans le Service mobile aéronautique.

## ANNEXE I

### ÉLABORATION ET APPLICATION 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 par [NBS, 1967]. On a admis, dans ces calculs, que la Terre avait une surface régulière et que son coefficient de rayon équivalent $k$ était de 4/3. Les statistiques utilisées pour les évanouissements de puissance à long terme correspondent à un climat continental tempéré.

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.

---

* Cet Avis doit être porté à l'attention de la Commission d'études 8.

** Il convient de souligner que ces courbes sont fondées sur des données obtenues principalement pour un climat continental tempéré. Ces courbes doivent être utilisées avec prudence pour les autres climats.

*** Des renseignements complémentaires sont nécessaires pour la prévision des niveaux de brouillage pendant de faibles pourcentages de temps (voir l'Annexe I).

Il est suggéré 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 de ces courbes permet à la longue de résoudre cette question. Pour les niveaux de brouillage existant pendant de petits pourcentages du temps, on peut tirer quelques indications de l'Avis 452-2, mais d'autres renseignements peuvent être encore nécessaires. Dans le cas des ondes centimétriques, il faut tenir compte de l'affaiblissement considérable qui est causé pendant de petits pourcentages du temps par les précipitations.

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note n°. 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va (USA)

## ANNEXE II

## DESCRIPTION DES COURBES

Les courbes sont contenues dans les Fig. 1 à 5. Il convient de noter les points suivants:

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.

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 $\pm$ 2 dB.

3. Le mille marin et le «foot» étant les unités de longueur couramment utilisées en aviation, ces unités ont servi de base pour la présentation des figures et des tableaux. Cependant, on a donné leurs correspondances dans le système métrique.

4. Les hauteurs d'antenne indiquées vont de 15 m à 18 300 m (50 feet à 60 000 feet) (il s'agit aussi bien des stations au sol que des aéronefs en vol). Au § 2 du Rapport 239-4, il est indiqué comment on doit procéder pour interpoler entre les hauteurs d'antenne données.

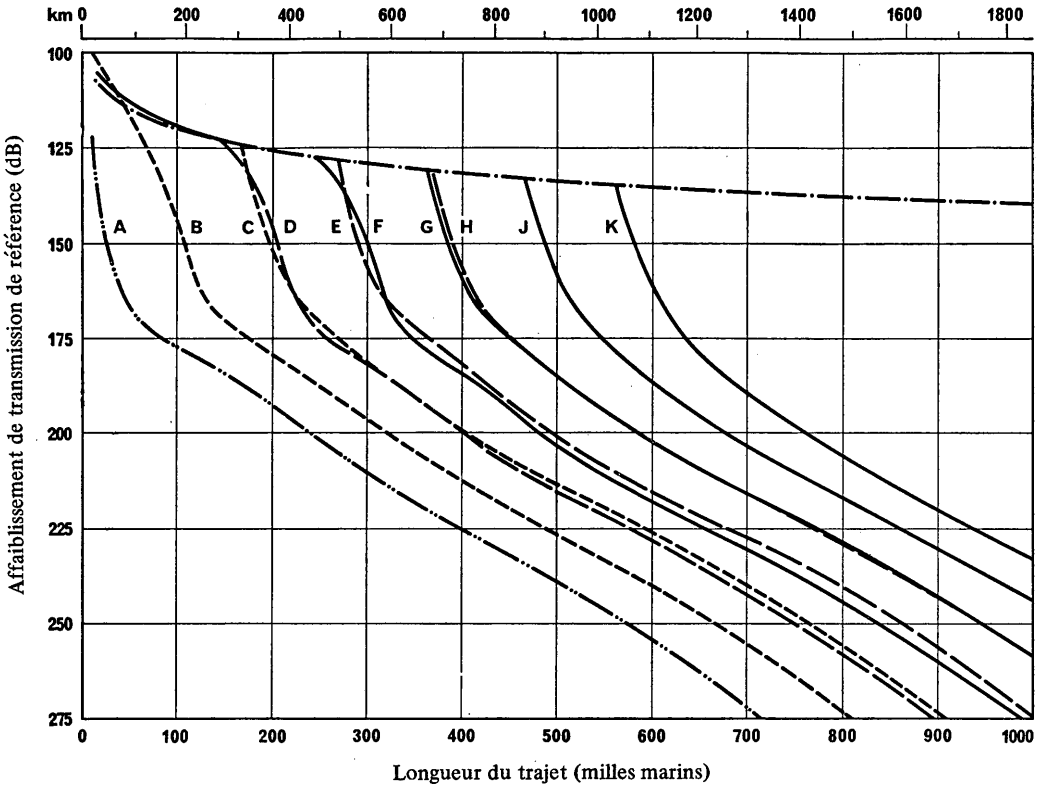



FIGURE 1 – *Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental*

$N_S = 301$ ($k = 4/3$), $\Delta h = 0$, 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 | 1524 | 5000 |
| C | 1524 | 5000 | H | 7620 | 25000 |
| D | 15,2 | 50 | J | 7620 | 25000 |
| E | 1524 | 5000 | K | 18300 | 60000 |

$H_2$

———— 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

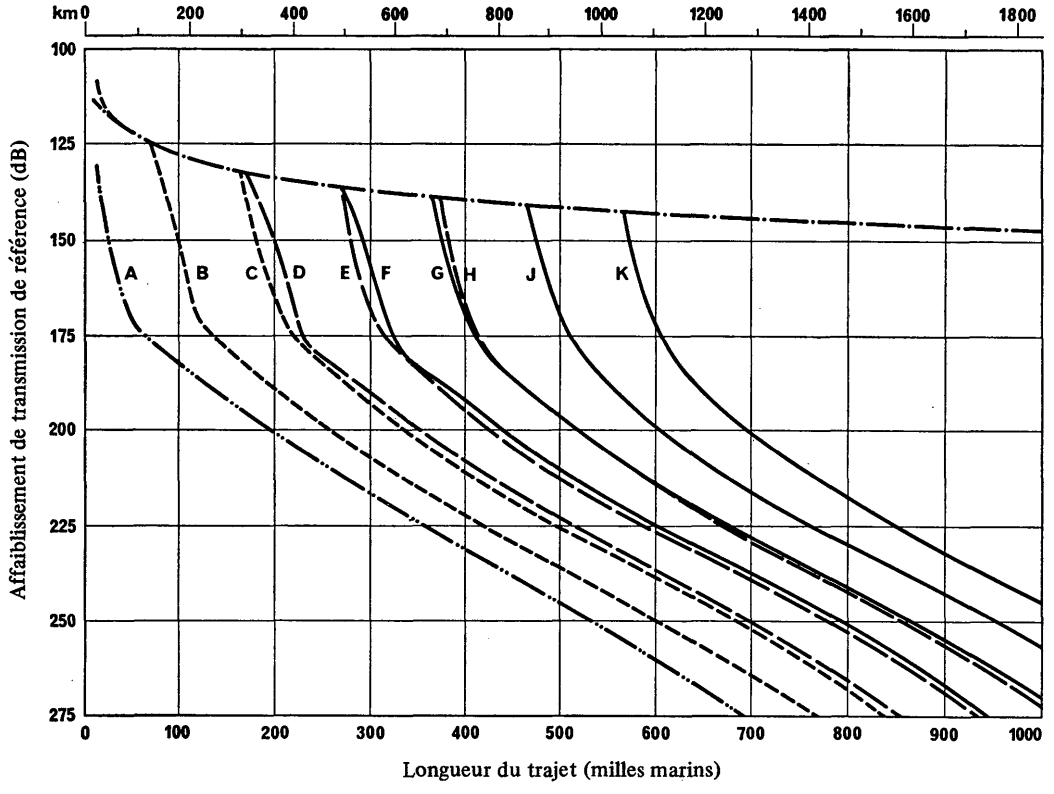



FIGURE 2 – *Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental*

$N_S = 301$ ($k = 4/3$), $\Delta h = 0$, 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 | 7620 | 25 000 |
| D | 15,2 | 50 | J | 7620 | 25 000 |
| E | 1524 | 5000 | K | 18300 | 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

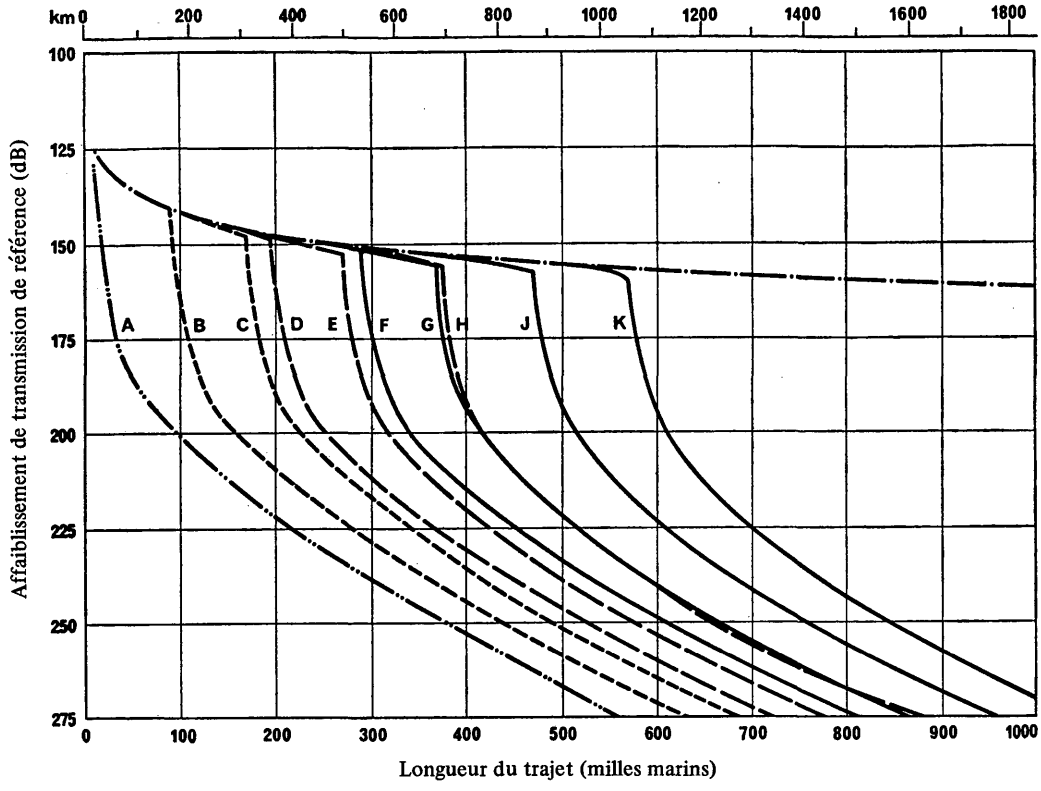



FIGURE 3 – *Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental*

$N_S = 301$ ($k = 4/3$), $\Delta h = 0$, 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 | 1524 | 5000 |
| C | 1524 | 5000 | H | 7620 | 25000 |
| D | 15,2 | 50 | J | 7620 | 25000 |
| E | 1524 | 5000 | K | 18300 | 60000 |

$H_2$

———— 18300 m (60000 feet)
— — — 7620 m (25000 feet)
- - - - - - - 1524 m (5000 feet)
—·—·— 15,2 m (50 feet)

———·———·——— espace libre

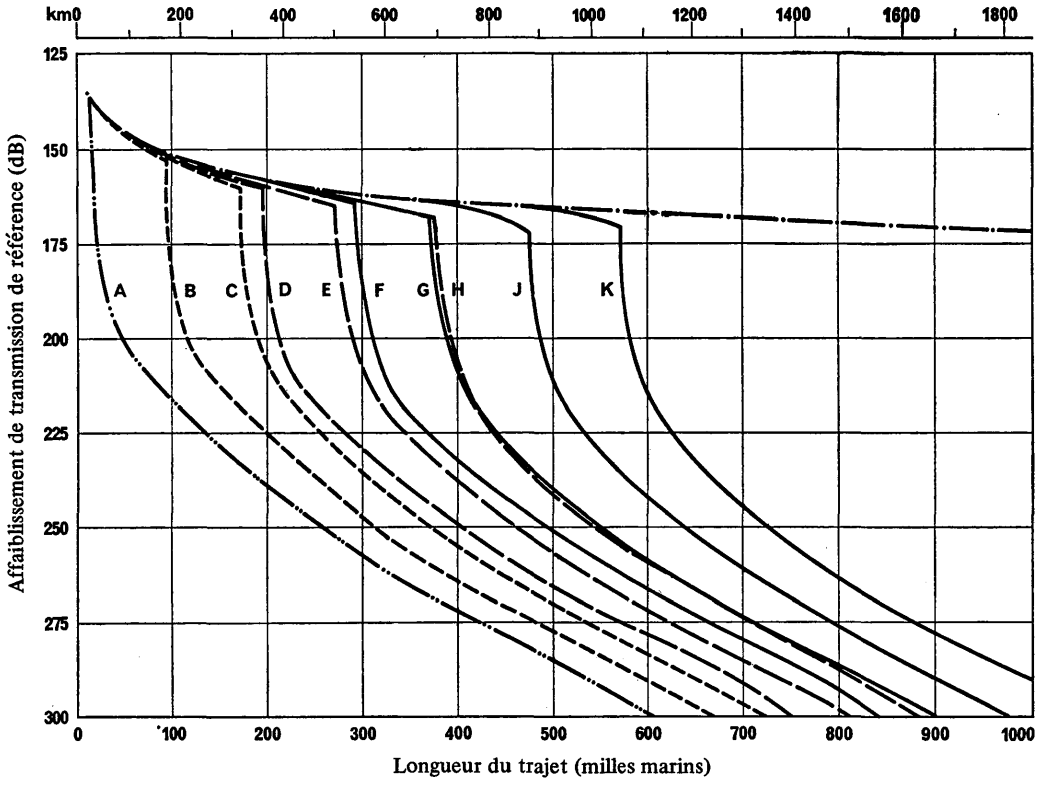



FIGURE 4 – *Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental*

$N_S = 301$ ($k = 4/3$), $\Delta h = 0$, 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

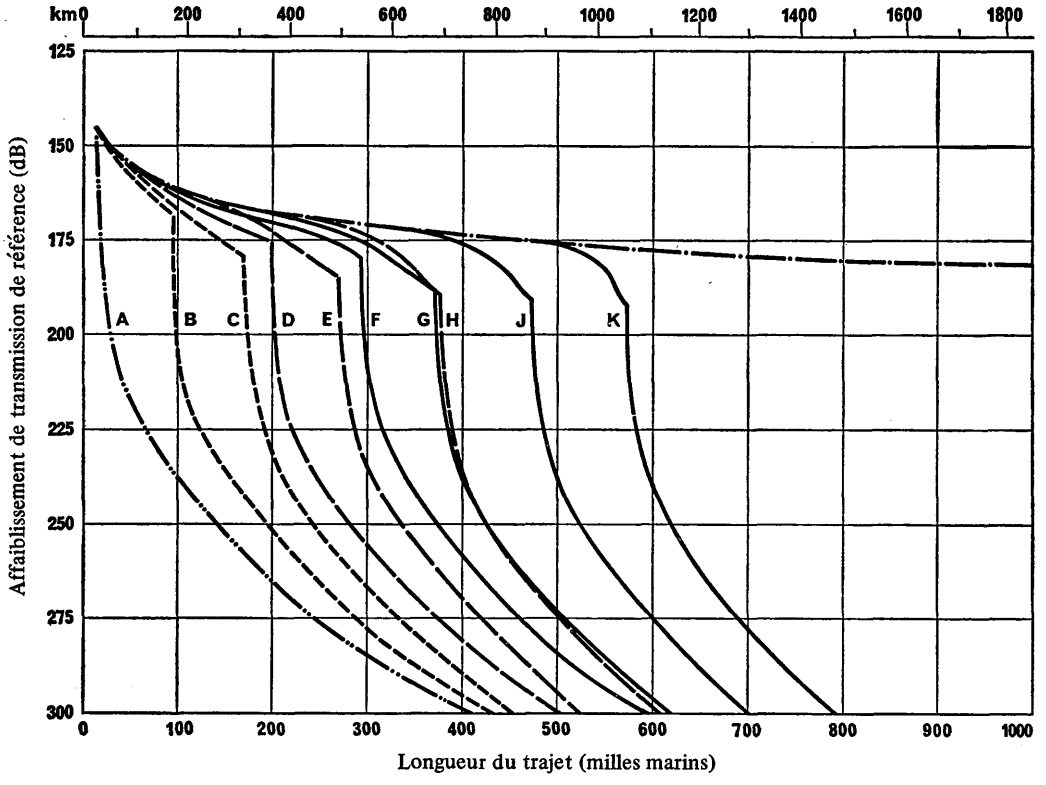



FIGURE 5 – *Valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence, climat tempéré continental*

$N_S = 301$ ($k = 4/3$), $\Delta h = 0$, 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 | 1524 | 5000 |
| C | 1524 | 5000 | H | 7620 | 25000 |
| D | 15,2 | 50 | J | 7620 | 25000 |
| E | 1524 | 5000 | K | 18300 | 60000 |

$H_2$
———— 18300 m (60000 feet)
— — — 7620 m (25000 feet)
- - - - - - - 1524 m (5000 feet)
—·—·— espace libre
—··—··— 15,2 m (50 feet)

AVIS 529 *

## COURBES DE PROPAGATION DES ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES POUR LE SERVICE MOBILE TERRESTRE

(Programme d'études 7E-1/5)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que le besoin se fait sentir de fournir des directives aux ingénieurs pour la planification des services mobiles terrestres de radiocommunications dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les méthodes indiquées dans le Rapport 567-1 soient adoptées ** à titre provisoire pour déterminer le champ aux hauteurs d'antenne qui peuvent se présenter dans le Service mobile terrestre.

---

RAPPORT 567-1 ***

## MÉTHODES ET STATISTIQUES PERMETTANT D'ÉVALUER LE CHAMP POUR LES SERVICES MOBILES TERRESTRES FONCTIONNANT DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 MHz ET 1 GHz

(Programme d'études 7E-1/5)

(1978)

### 1. Introduction

Pour la partie inférieure de la gamme des ondes métriques et pour des fréquences légèrement inférieures à 30 MHz, le présent Rapport donne une méthode pour prévoir le champ dans le cas des services mobiles.

Ce Rapport contient des courbes de propagation pour les fréquences comprises entre 100 et 250 MHz, qu'on a tracées d'après celles de l'Avis 370-3 en utilisant, pour les antennes de moindre hauteur, des fonctions expérimentales du gain dû à la hauteur comme celles qui sont indiquées au § 2 ci-après. Les résultats de mesure obtenus dans des conditions qui s'appliquent au service mobile terrestre sont à employer chaque fois qu'on en dispose. Deux autres familles de courbes de propagation, pour des fréquences proches de 450 et 900 MHz, sont extraites d'une publication japonaise [Okumura et autres, 1968].

Des méthodes informatiques pour l'évaluation du champ sont exposées dans le Rapport 239-4.

TABLEAU I – *Facteurs de correction pour hauteur d'antenne de 3 m*

| Zone | Bandes I, II(1) | Bande III(1) | Bandes IV, V(1) |
|---|---|---|---|
| Zone rurale (dB) | 9 | 7 | Valeurs données par la Fig. 18 de l'avis 370-3 $d < 50$ km |
| Zone urbaine (dB) | 9 | 11 | 14 |

(1) Les bandes de fréquences figurant dans ce tableau ont les limites suivantes :

Bande I : 41 – 68 MHz
Bande II : 87,5 – 100 MHz
Bande III : 162 – 230 MHz
Bande IV : 470 – 582 MHz
Bande V : 582 – 960 MHz

* Cet Avis doit être porté à l'attention de la Commission d'études 8.

** Il convient de souligner que les courbes relatives à la bande des ondes décimétriques sont fondées sur des données mesurées dans des zones urbaines déterminées et doivent être utilisées avec prudence s'il s'agit d'autres zones.

*** Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 8.

## 2. Effets d'une variation de la hauteur de l'antenne d'une station mobile

Les courbes de propagation de l'Avis 370-3 sont directement applicables aux services dans lesquels l'antenne de réception se trouve à une hauteur de 10 m au-dessus du sol. Dans le service mobile terrestre, comme l'antenne d'une station mobile se trouve généralement plutôt à une hauteur d'environ 3 m au-dessus du sol, sinon moins, le champ reçu est inférieur à celui indiqué par ces courbes.

Les travaux décrits dans diverses publications [Uhlen, 1962; Králik et autres, 1962; Kinase, 1969; Okumura et autres, 1968; Ogulewicz, 1971] et des travaux effectués au Royaume-Uni font connaître le gain qu'on peut espérer obtenir en portant la hauteur de l'antenne de 3 à 10 m au-dessus du sol. Les valeurs du facteur de correction (dB) à soustraire des ordonnées des courbes de l'Avis 370-3 quand la hauteur d'antenne est ramenée à 3 m sont indiquées dans le Tableau I. Les courbes qui figurent dans le présent Rapport ont déjà été rapportées à 3 m ou 1,50 m.

Les valeurs ci-dessus sont applicables à des distances au plus égales à 50 km. Pour les distances supérieures à 100 km, il faut les diminuer de moitié; pour les distances intermédiaires, on procède à une interpolation linéaire.

Des mesures faites au Japon ont montré que le gain dû à un rehaussement de 1,5 à 3 m, pour la bande des ondes décimétriques dans les zones urbaines, est de 3 dB [Okumura et autres, 1968]. Cette valeur peut servir à estimer le champ médian, dans le cas d'une hauteur d'antenne de 3 m, en utilisant les données des Fig. 1 et 2 (bandes IV et V, zone urbaine).

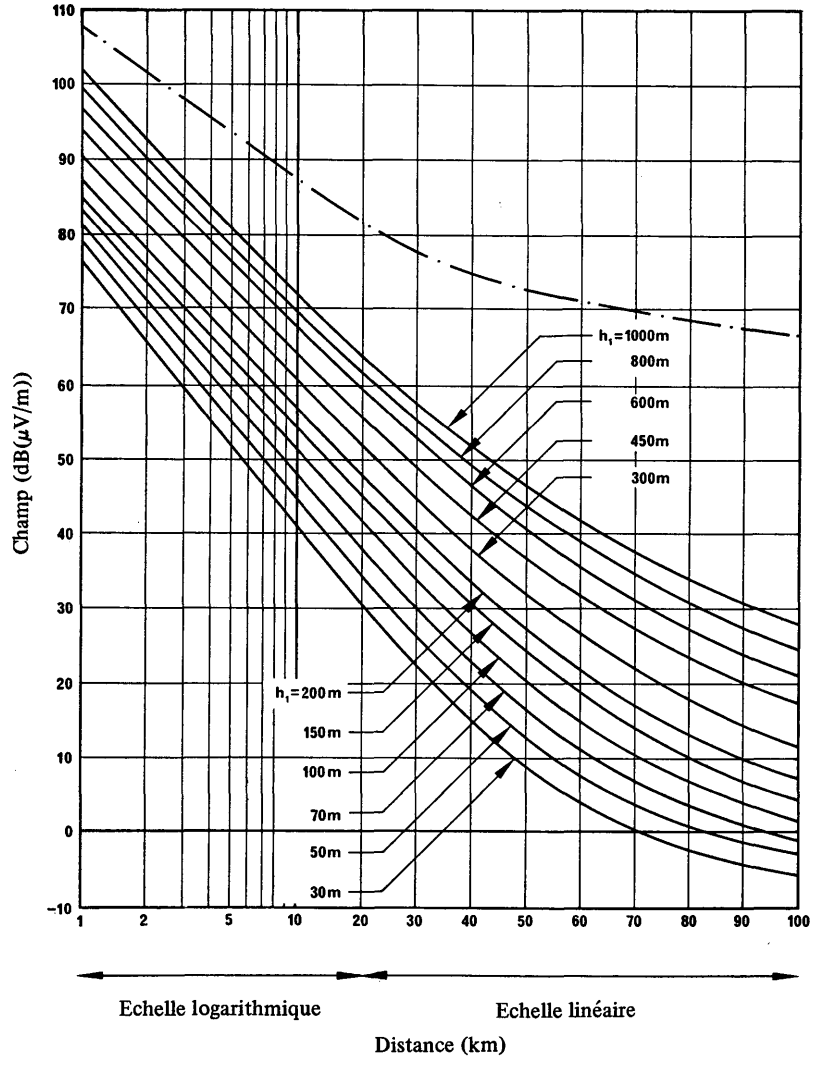



FIGURE 1 – *Champ (dB(μV/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW*

Fréquence ≈ 450 MHz, zone urbaine, 50 % du temps, 50 % des emplacements; $h_2$ = 1,5 m

•—•—•—• propagation en espace libre

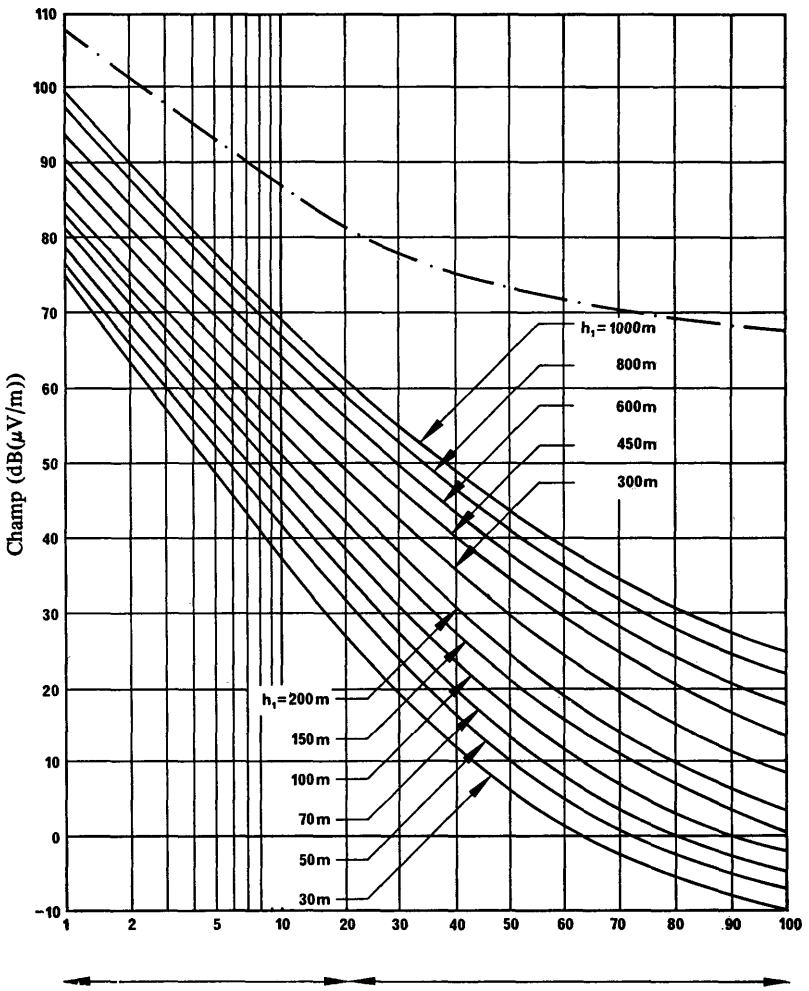



FIGURE 2 – *Champ (dB(μV/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW*

Fréquence ≈ 900 MHz, zone urbaine, 50 % du temps, 50 % des emplacements; $h_2 = 1{,}5$ m

·—·—·—· propagation en espace libre

Des mesures de champ faites dans des zones rurales de la République Populaire de Pologne à des fréquences comprises entre 34 et 306 MHz ont donné des résultats qui concordent bien avec les courbes de propagation de l'Avis 370-3, après correction pour les effets de terrain.

## 3. Phénomènes de dégradation de la polarisation *

Par définition, le degré de transpolarisation est le rapport de l'amplitude de la composante à polarisation orthogonale, produite par un certain mécanisme de propagation, à l'amplitude de l'onde initiale à polarisation rectiligne (monoplanaire). Pour les systèmes du service mobile terrestre, il est parfois plus commode de considérer le rapport de découplage que l'on obtient avec une antenne de réception fonctionnant dans son environnement normal. En règle générale, le rapport de découplage s'exprime en décibels et, en pratique, est de signe opposé mais de valeur égale au degré de transpolarisation, à condition que ce dernier ne soit pas trop petit.

En Suède, on a mesuré le degré de transpolarisation dans le cas où les deux antennes sont peu élevées au-dessus du sol ($< 10$ m) et constaté qu'il augmente en même temps que la fréquence: il passe de $-18$ dB environ à 35 MHz à $-7$ dB environ à 950 MHz [Blomquist, 1965].

Le degré de transpolarisation obéit à une distribution log-normale, avec un écart type qui dépend quelque peu de la fréquence. Dans la gamme de fréquences de 30 à 1000 MHz, la 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 dégradation de la polarisation varie avec le temps suivant deux modes. Ce peut être une variation lente causée par une modification des caractéristiques électriques du sol, en fonction des conditions météorologiques. Cet effet est d'autant plus marqué que la fréquence est plus basse. L'autre mode de variation de la dégradation de la polarisation avec le temps résulte du mouvement des arbres; il s'agit d'un phénomène d'évanouissement par transpolarisation, dont l'amplitude atteint plusieurs décibels, même pour des vents de vitesse très modérée.

## 4. Affaiblissement dû à la végétation et aux bâtiments

On trouvera dans les Rapports 236-4 et 239-4 des études de l'affaiblissement dû à la végétation, en fonction de la fréquence.

Le Rapport 239-4 traite les problèmes généraux que pose l'affaiblissement dû à la présence de bâtiments.

Selon les résultats d'expériences menées au Japon [Kozono et Watanabe, 1977], le champ médian est particulièrement affecté par les bâtiments qui entourent une station mobile, l'antenne de celle-ci étant presque toujours montée plus bas que le sommet des bâtiments. A 450 MHz, la présence de bâtiments modifie considérablement le champ médian, dans une zone peu étendue (environ 0,25 $km^2$), par rapport à son niveau de référence typique d'une zone urbaine (Fig. 1). La Fig. 3 représente la variation de cet écart local en fonction du paramètre $\alpha$, qui est le pourcentage de la zone recouvert par des bâtiments. Chaque point de ce graphique donne l'écart du champ médian dans une telle zone peu étendue. On a constaté que les niveaux du champ médian dans la bande des 800 MHz sont en corrélation étroite avec ceux qu'on a relevés dans la bande des 400 MHz.

Des mesures faites dans des zones urbaines en République Populaire de Pologne à des fréquences comprises entre 34 et 306 MHz indiquent que la dispersion des niveaux du champ est quasi indépendante de la fréquence.

Des mesures de champ faites à 900 MHz dans diverses zones urbaines des Etats-Unis [Reudink et Black, 1972; FCC, 1971; Jakes, 1974] ont mis en évidence de notables différences entre les niveaux moyens du signal, d'une ville à une autre, qu'on ne peut pas imputer à des différences entre les types des terrains correspondants. L'écart du champ médian dans des zones peu étendues (environ 0,25 $km^2$), par rapport à son niveau moyen à une distance donnée varie avec un écart type de 3 à 12 dB. On cherche maintenant à établir une relation entre ces variations du niveau du signal et de l'écart type, d'une part, et la distribution des arbres et des bâtiments dans la zone considérée, d'autre part.

---

* Voir le Rapport 722.

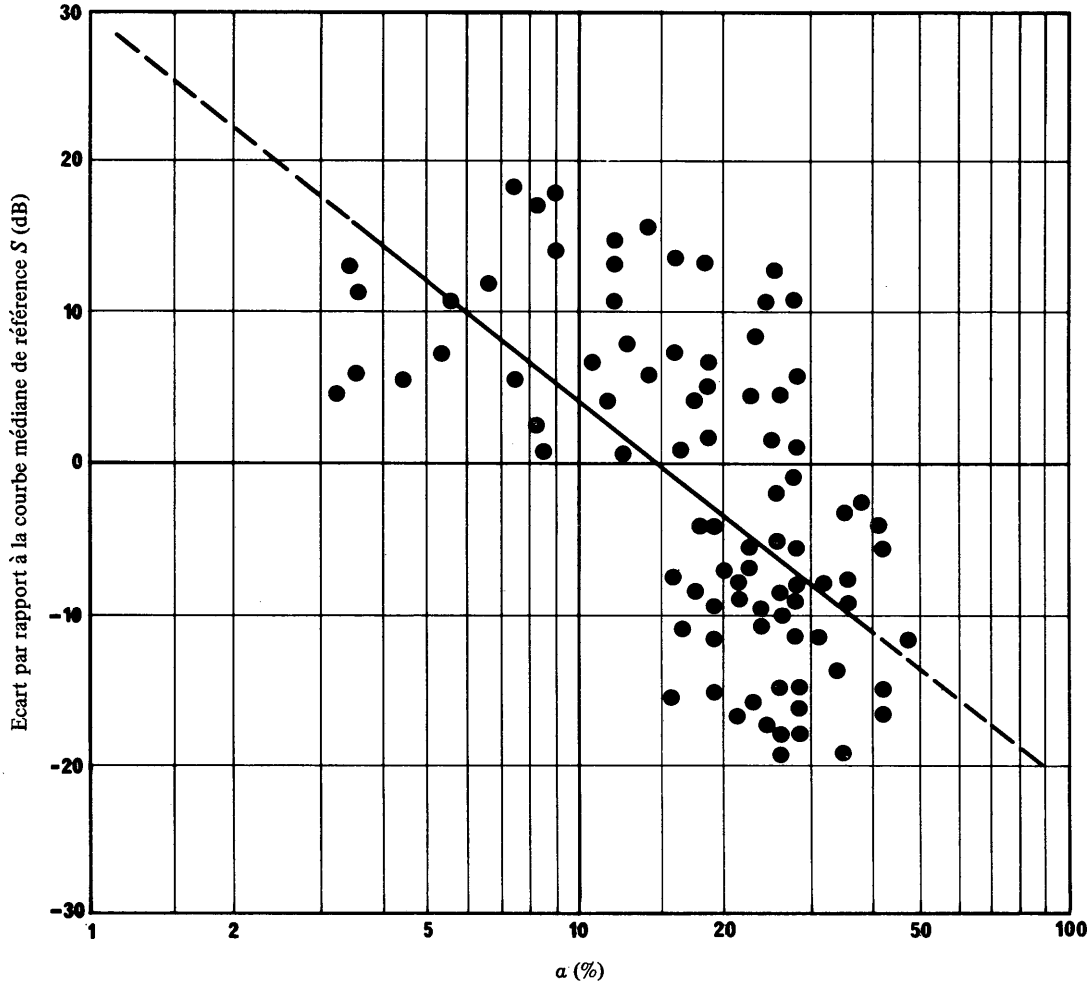



FIGURE 3 – *Ecart par rapport à la courbe médiane du champ, dû à la présence de bâtiments autour de la station mobile*

Courbe de régression représentée sur cette figure :

$S = 30 - 25 \log \alpha$

$f = 450$ MHz

$3\,\% < \alpha < 50\,\%$

$\alpha$ désigne le pourcentage de la superficie couvert par des bâtiments.

## 5. Niveaux du champ en ondes métriques et décimétriques

### 5.1 *Niveau calculé du champ*

Dans le cas de trajets à visibilité directe pour des fréquences correspondant aux ondes métriques et légèrement inférieures, on peut calculer le champ au moyen de la méthode décrite ci-dessous, fondée sur des travaux qui ont été effectués en République Populaire de Pologne [Wojnar, 1977] et font suite à des recherches menées aux Etats-Unis [Bullington, 1957].

L'utilisation de hauteurs d'antenne équivalentes établies sur la base des constantes du sol convient d'autant mieux que la fréquence est plus basse et que l'antenne est montée moins haut et s'il s'agit d'une onde à polarisation verticale et d'un trajet au-dessus d'un sol humide.

La formule suivante donne une estimation en première approximation du champ médian $E$ (μV/m):

$$E = 69 \sqrt{P_t} \frac{h_t h_r}{\lambda d^2} \qquad (1)$$

dans laquelle

$P_t$ : puissance apparente rayonnée par l'émetteur (W)

$d$ : distance entre antennes (km)

$h_t$ : hauteur équivalente de l'antenne d'émission (m)

$h_r$ : hauteur équivalente de l'antenne de réception (m)

$\lambda$ : longueur d'onde (m).

Ces hauteurs équivalentes se déterminent au moyen des formules:

$$h_t = \sqrt{h_1^2 + h_0^2} \tag{2}$$

$$h_r = \sqrt{h_2^2 + h_0^2} \tag{3}$$

où

$h_1$ : hauteur réelle de l'antenne d'émission au-dessus du sol (m)

$h_2$ : hauteur réelle de l'antenne de réception au-dessus du sol (m)

$h_0$ : (m) ayant pour expression:

en polarisation verticale, $h_0 = \frac{\lambda}{2\pi}\left((\varepsilon+1)^2 + (60\lambda\sigma)^2\right)^{\frac{1}{4}}$ (m) (4)

en polarisation horizontale, $h_0 = \frac{\lambda}{2\pi}\left((\varepsilon-1)^2 + (60\lambda\sigma)^2\right)^{-\frac{1}{4}}$ (m) (5)

où

$\lambda$: longueur d'onde (m)

$\varepsilon$: constante diélectrique relative

$\sigma$: conductivité du sol (S/m)

Les valeurs des constantes du sol se trouvent dans l'Avis 527.

La formule (1) est valide dans la région où le champ décroît de façon monotone en fonction de la distance jusqu'à l'horizon radioélectrique.

Pour tenir compte de la topographie et de la présence de végétation et d'ouvrages, on peut apporter à la formule (1) des corrections qu'on trouvera dans l'Avis 370-3 (Fig. 7 et 8a) et le Rapport 239-4.

Au-delà de l'horizon radioélectrique, à des fréquences inférieures à 90 MHz et pour de petits pourcentages du temps, les effets de l'ionosphère peuvent être importants; ils sont traités dans le Volume VI du CCIR.

5.2 *Courbes de propagation*

Les Fig. 4, 5 et 6 représentent des courbes de propagation qui conviennent pour des fréquences comprises entre 100 et 250 MHz environ, une hauteur d'antenne de la station mobile de 3 m, une hauteur d'antenne de la station fixe comprise entre 10 m et 600 m, en zone rurale, pour 50% des emplacements et pendant 50%, 10% et 1% du temps.

Des mesures effectuées en République Populaire de Pologne [Kisło, 1977] sur un trajet transhorizon, à une fréquence de 342 MHz, ont montré que les valeurs du champ dépassées pendant 1% du temps sont supérieures de 2 à 8 dB aux valeurs estimées d'après les courbes du CCIR et que les valeurs dépassées pendant 1% et 10% du temps varient très sensiblement entre le jour et la nuit.

Les Fig. 1 et 2 représentent des courbes de propagation qui conviennent pour 450 et 900 MHz, une hauteur d'antenne de la station mobile de 1,5 m et une hauteur d'antenne de la station fixe comprise entre 30 et 1000 m, en 50% des emplacements et pendant 50% du temps. Ces courbes particulières ont pour base des mesures effectuées dans des zones urbaines du Japon; elles sont à comparer avec les données dont on peut disposer pour d'autres zones.

On calcule la relation entre, d'une part, le champ, $E'$ (dB($\mu$V/m), pour une puissance de 1 kW rayonnée par un doublet demi-onde), déterminé sur les courbes du présent Rapport et, d'autre part, l'affaiblissement de transmission de référence, $L_b$ (affaiblissement entre des antennes isotropes) au moyen de l'expression:

$$L_b = 139{,}4 + 20 \log f_{\text{MHz}} - E' \quad \text{dB} \tag{6}$$

On calcule l'affaiblissement de transmission entre des doublets demi-onde, $L_d$, au moyen de l'expression:

$$L_d = 135{,}1 + 20 \log f_{\text{MHz}} - E' \quad \text{dB} \tag{7}$$

La façon de calculer l'affaiblissement en espace libre est expliquée dans l'Avis 525.

Dans le cas d'une propagation par trajets multiples, il se peut que les relations (6) et (7) ne soient pas vérifiées.

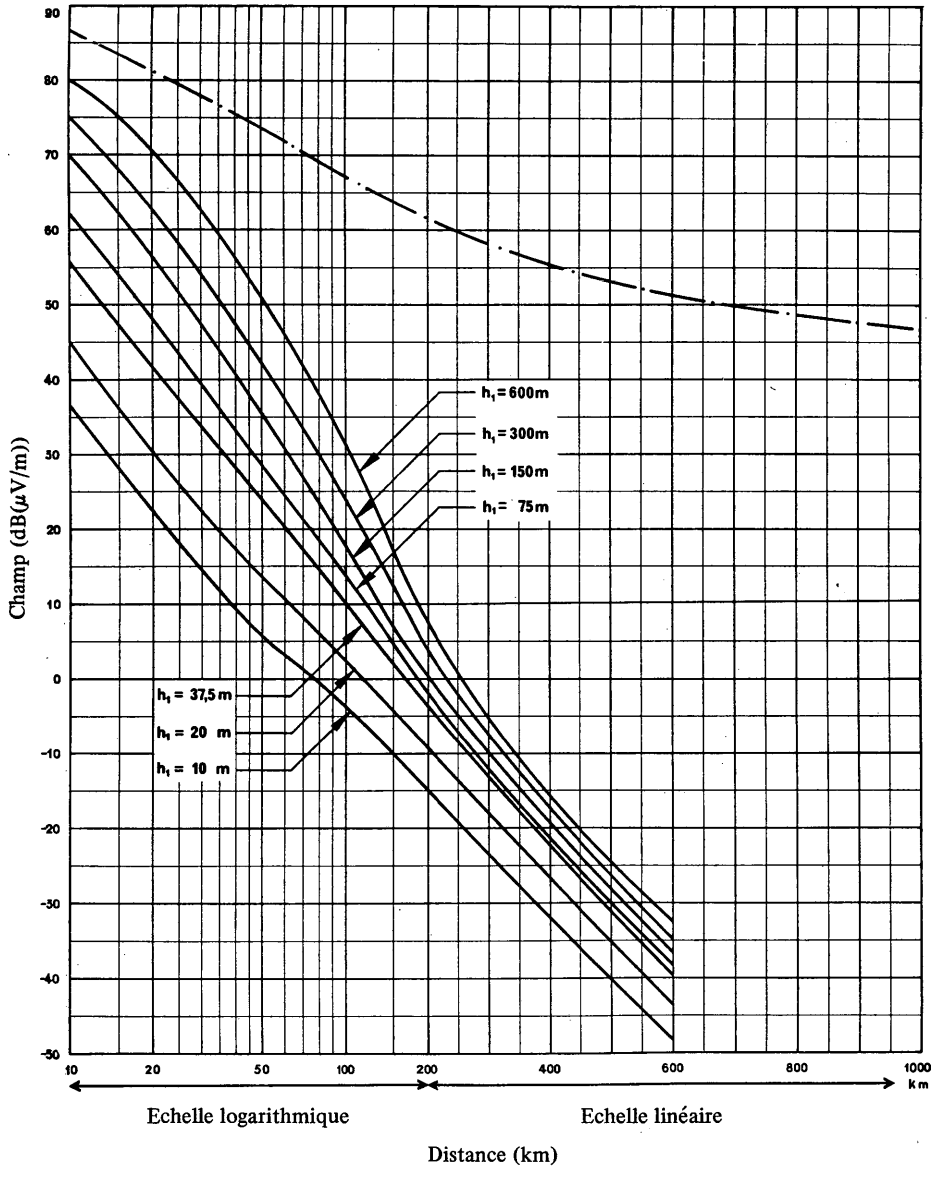



FIGURE 4 – *Champ (dB(μV/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW*

Fréquence ≈ 150 MHz, trajet terrestre, zone rurale, 50 % du temps, 50 % des emplacements; $h_2$ = 3 m

•—•—•—• propagation en espace libre

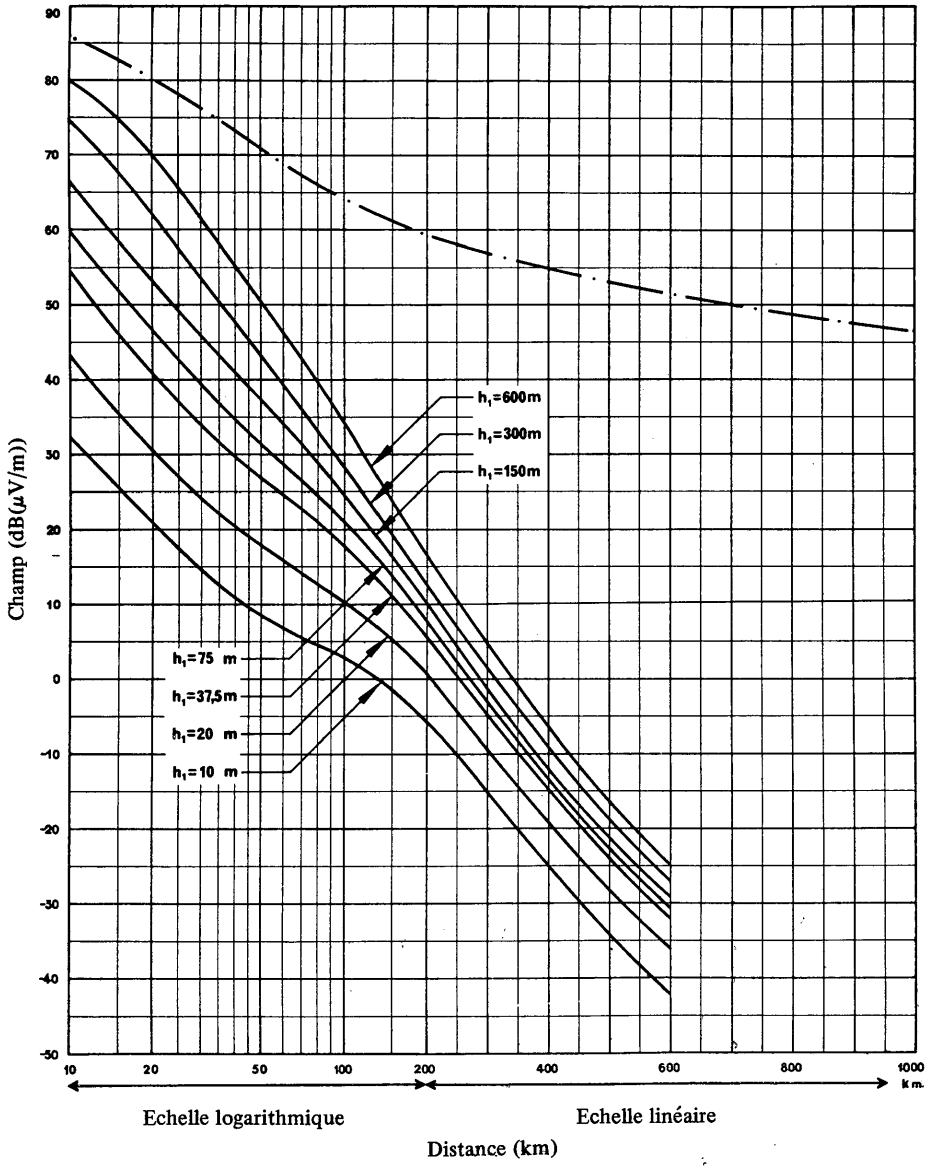



FIGURE 5 – *Champ (dB(μV/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW*

Fréquence ≈ 150 MHz, trajet terrestre, zone rurale, 10 % du temps, 50 % des emplacements ; $h_2 = 3$ m

·—·—·—· propagation en espace libre

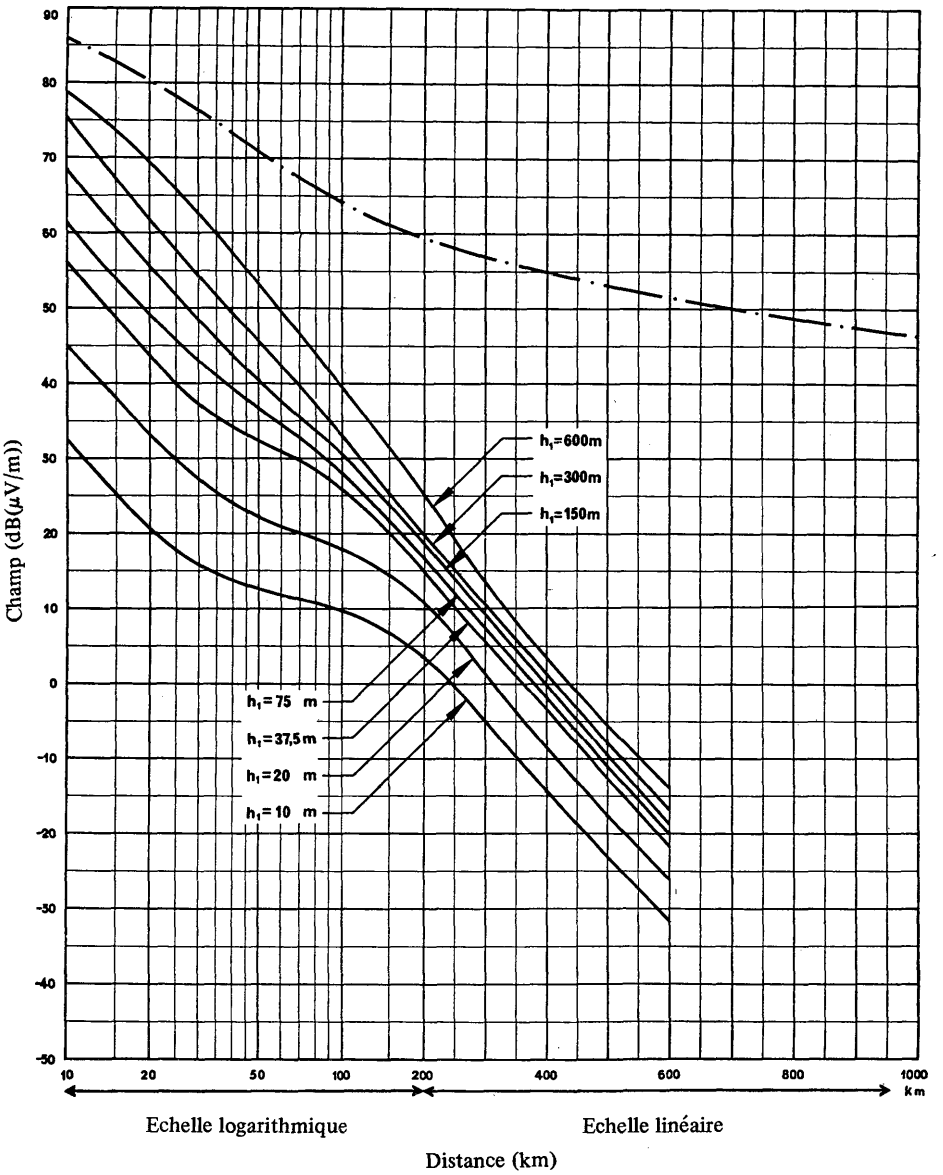



FIGURE 6 – *Champ (dB(μV/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW*

Fréquence ≈ 150 MHz, trajet terrestre, zone rurale, 1 % du temps, 50 % des emplacements; $h_2$ = 3 m

•—•—•—• propagation en espace libre

Des données sur le champ, qui ont été relevées dans plusieurs zones urbaines des Etats-Unis, à 900 MHz, manifestent en général une bonne concordance avec l'allure des courbes de variation en fonction de la distance pour les zones urbaines, qui sont représentées dans les Fig. 1 et 2. Les données recueillies dans certaines de ces campagnes de mesure font apparaître cependant des différences très sensibles des niveaux moyens du champ par rapport à ces courbes.

## 6. Influence de l'heure et du type du terrain sur le champ

Les problèmes que pose l'influence de l'heure et du type du terrain sur le champ sont traités dans l'Avis 370-3 et le Rapport 239-4.

En pratique, les approximations ci-après sont très souvent utiles et suffisamment précises, par exemple pour évaluer la probabilité de brouillage lors de la planification des fréquences pour le service mobile [Rue, 1974]:

- les distributions du champ en fonction du temps et des emplacements sont supposées du type gaussien (dB) dans le domaine considéré (entre, 5 et 50% environ pour la distribution en fonction du temps);
- on calcule les écarts types des distributions en fonction des emplacements et du temps ($\sigma_L$ et $\sigma_t$) d'après les indications de l'Avis 370-3, en supposant que la distribution en fonction du temps est du type gaussien pour les pourcentages du temps compris entre 5 et 50% (Tableau II);
- l'écart type global a pour expression $\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_t^2}$.

TABLEAU II – *Ecarts types $\sigma_L$ et $\sigma_t$*

<table>
<tr><td rowspan="2">Bande</td><td colspan="4" rowspan="2">$\sigma_L$ (dB)</td><td colspan="5">$\sigma_t$ (dB)</td></tr>
<tr><td>$d$ (km)</td><td>50</td><td>100</td><td>150</td><td>175</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ondes métriques</td><td colspan="4" rowspan="2">8</td><td>Terre et mer</td><td>3</td><td>7</td><td>9</td><td>11</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ondes décimétriques</td><td rowspan="2">$\Delta h$ (m)</td><td>50</td><td>150</td><td>300</td><td>Terre</td><td>2</td><td>5</td><td>7</td><td></td></tr>
<tr><td>10</td><td>15</td><td>18</td><td>Mer</td><td>9</td><td>14</td><td>20</td><td></td></tr>
</table>

*Note* – Les valeurs indiquées au Tableau II concernent les zones rurales. Elles doivent être utilisées avec prudence pour les Fig. 1 et 2, qui concernent les zones urbaines.

Une analyse récente d'un grand nombre des résultats de mesures effectuées aux Etats-Unis [Longley, 1976] a conduit à la formule suivante, qui exprime l'écart type pour l'emplacement $\sigma_L$ en fonction de la longueur d'onde $\lambda$ et de l'irrégularité du terrain $\Delta h$:

$$\sigma_L = 6 + 0{,}6875\,(\Delta h/\lambda)^{1/2} - 0{,}00625\,(\Delta h/\lambda) \quad \text{(dB)} \qquad (8)$$

à condition que $(\Delta h/\lambda) \leqslant 3000$; si $(\Delta h/\lambda) > 3000$, on a $\sigma_L = 25$ dB.

Les données analysées avaient été recueillies de place en place à des fréquences de 30 MHz à 10 GHz sur des trajets s'étendant de 500 m à 120 km et franchissant des terrains divers (de la plaine à des montagnes rocailleuses), avec des antennes montées à des hauteurs de 60 cm à 15 m au-dessus du sol.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


BLOMQUIST, A. [1965] Depolarization of radio-waves in terrain. Res. Inst. of National Defence, Stockholm, Suède, Rapport A648.

BULLINGTON, K. [1957] Radio propagation fundamentals. *BSTJ*, Vol. 36, 593.

FCC [1971] Examination of the feasibility of conventional land mobile operations at 950 MHz, Rapport FCC R-7102, PB235511, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

JAKES, William C. [1974] *Microwave mobile communications.* John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.

KINASE, A. [mars 1969] Influence of terrain irregularities and environmental clutter surroundings on the propagation of broadcasting waves in the UHF and VHF bands. Monographie technique de NHK, 14, Japon.

KISŁO, M. [1977] Badanie zmienności czasowej natężenia pola w zakresie czestotliwości 300 MHz dla potrzeb radiokomunikacji ruchomej (Etude des variations du champ pour les services mobiles terrestres dans la bande des 300 MHz) (en polonais). Prace Instytutu Łączności.

KOZONO, S. et WATANABE, K. [octobre 1977] Influence of environmental buildings on land mobile radio propagation. *IEEE Trans. Com. Soc.*, COM-10, 6.

KRÁLÍK, F., KÜHN, U. et VOČADLO, V. [1962] Ausbreitung von Dezimeterwellen bei horizontaler und vertikaler Polarisation und Höhenabhängigkeit der Feldstärke im Gebirge (Propagation des ondes décimétriques en polarisations horizontale et verticale, et variation du champ en fonction de la hauteur en terrain montagneux). *Techn. Mitteilungen RFZ*, Vol. 6, **4**, 162-166.

LONGLEY, Anita G. [mai 1976] Location variability of transmission loss – land mobile and broadcast systems. Office of Telecommunications, Rapport PB254472, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

OGULEWICZ, S. [1971] Propagation en ondes décimétriques dans les zones urbaines. *Prace Instytutu Łączności*, Vol. 18, 4 (64) (en polonais) – Un résumé de cet article a été présenté dans le Doc. CCIR [1970-74] 5/81, (République Populaire de Pologne).

OKUMURA, Y. et autres [septembre-octobre 1968] Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service. *Rev. Elect. Comm. Lab.*, Japon, Vol. 1-6, 9-10.

REUDINK, D. O. et BLACK, D. M. [mai 1972] Some characteristics on mobile radio propagation at 836 MHz in the Philadelphia area. *IEEE Trans.*, VT-21, **2**.

RUE, O. [1974] Coverage and interference in mobile radio. Central Administration of Swedish Telecommunications, Rapport Urf 74 0 96.

UHLEN, N. [1962] *TELE I.* Fältstyrkemätningar och räckviddsbestämning för radioanläggningar (Mesures du champ et calculs de la gamme de couverture pour stations radioélectriques) (en suédois).

WOJNAR, A. [1977] Ground-wave radio links: unified analysis in simple terms. EUROCON'77, document 2, 3.6, Vol. 1, 262.

---

RAPPORT 228-2 *

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

(Question 7/5)

(1959 - 1963 - 1966 - 1978)

### 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 [TASO, 1959]:

1.1 Elle devrait pouvoir indiquer l'emplacement et l'étendue de toutes les zones recevant un service de qualité donnée.

1.2 Elle devrait tenir compte des variations les plus importantes dans le temps.

1.3 La méthode devrait être suffisamment fine pour pouvoir décrire l'étendue de la zone desservie (en superficie ou en population) et l'emplacement de cette zone dans des régions différentes et dans des directions différentes à partir de l'émetteur.

1.4 Elle devrait pouvoir traduire l'influence des brouillages causés par une ou plusieurs stations sous forme de diminution du service (en étendue et en emplacement).

1.5 Elle devrait permettre de caractériser au moins deux qualités de service.

1.6 Elle devrait permettre de définir la zone de service au moyen d'un nombre raisonnable de mesures et/ou de calculs du champ.

1.7 Elle devrait conduire à une représentation simple sur un diagramme à deux dimensions.

Après avoir étudié, d'une façon approfondie, les différentes méthodes permettant de représenter le service assuré en radiodiffusion sur ondes métriques et décimétriques, on recommande [TASO, 1959; FCC, 1949 et 1950] l'emploi d'une certaine «caractéristique de zone» comme étant le meilleur moyen d'expression statistique de la qualité de service. Il est bon d'expliquer le principe de cette méthode statistique pour le lecteur qui n'a jamais eu l'occasion de rencontrer cette expression. Dans des conditions de régime permanent, il a été possible de faire, en laboratoire, une étude statistique des rapports signal utile/signal brouilleur qui sont nécessaires pour donner à différents observateurs l'impression d'une image ou d'un son de qualité acceptable, et ceci en présence de diverses catégories de brouillage. Pour chaque type de brouillage, on définit un «rapport acceptable» qui est le rapport reconnu tel par un certain pourcentage des observateurs, 50% par exemple. En un lieu donné, il peut y avoir une variation avec le temps des signaux utiles et/ou du signal brouilleur; c'est pourquoi on définit un taux de

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 10 et 11.

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 [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957].

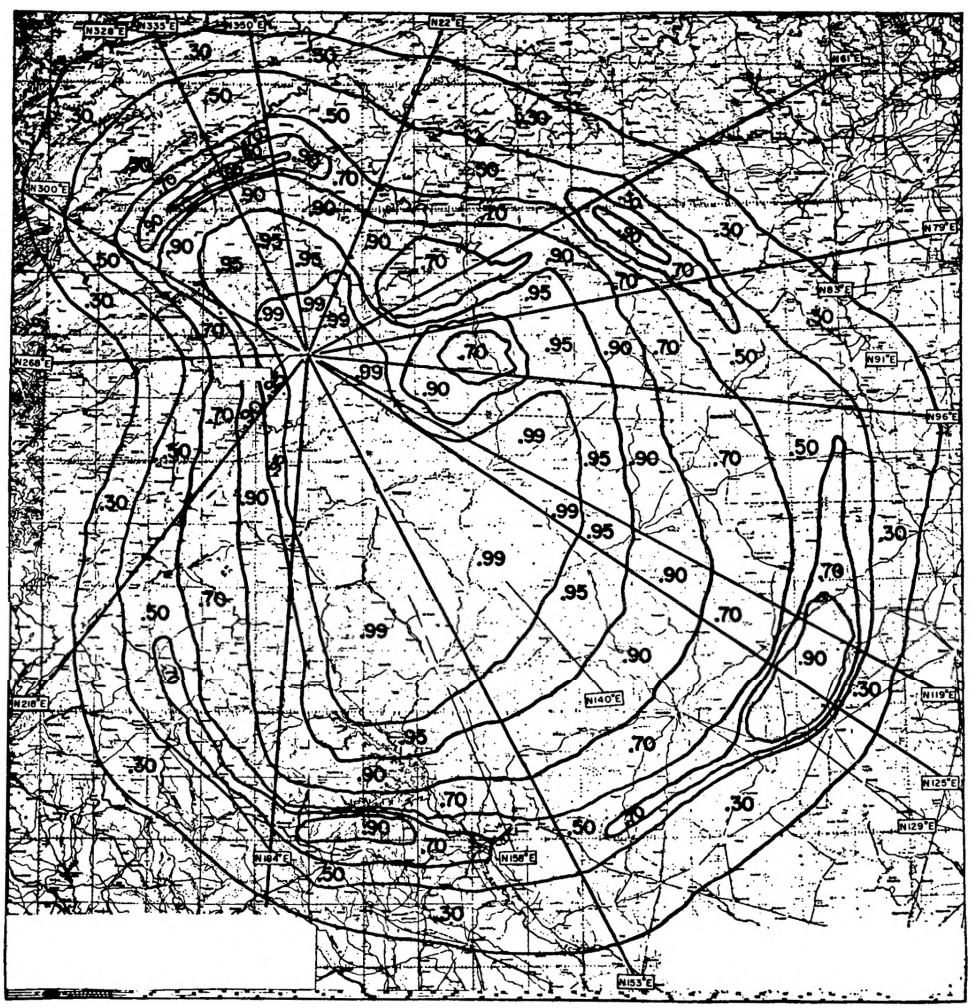



FIGURE 1 – *Notion de caractéristique de zone*

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

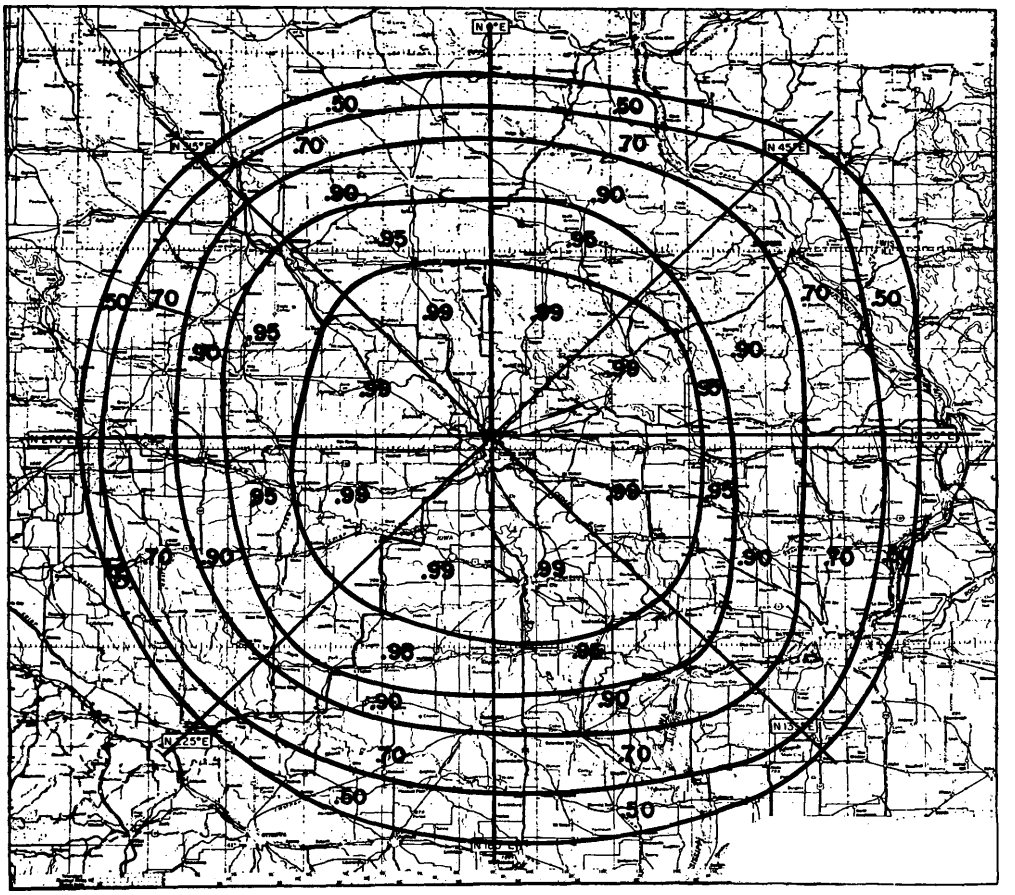



FIGURE 2 – *Notion de caractéristique de zone*

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

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 [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957].

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

## 2. Méthode de mesure

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

2.1 fournir une base pour évaluer l'étendue de la zone desservie pour une qualité de service donnée;

2.2 contrôler le diagramme de directivité d'une antenne d'émission ainsi que la puissance rayonnée par cette antenne;

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

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

2.4 les mesures doivent être assez aisément reproductibles, afin qu'on puisse les contrôler ultérieurement si on le désire;

2.5 la méthode doit permettre d'obtenir efficacement les renseignements nécessaires;

2.6 la méthode ne doit être ni dangereuse, ni trop onéreuse.

Diverses méthodes de mesure, employées couramment, satisfont aux critères ci-dessus à des degrés variables [UER, 1973].

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

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

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

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

### 2.7 *Mesures aux fréquences inférieures à 100 MHz*

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

D'une façon générale, il n'est guère commode de faire des mesures à 10 m 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 m) 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 $\varepsilon$ commise sur une valeur médiane soit inférieure à 2 ou 4 dB. En pratique, l'erreur acceptable $\varepsilon$ ne dépasse pas 2 dB dans la zone critique mais peut aller jusqu'à 4 dB dans les cas où la précision revêt moins d'importance. La Fig. 3, tracée dans l'hypothèse d'une répartition log-normale du champ, représente la relation entre le nombre requis d'échantillons et le «facteur de variation» $V$ défini comme étant le rapport, en dB, des champs dépassés respectivement en 50% et 90% des points situés dans la ville ou autre zone urbaine considérée.

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

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

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

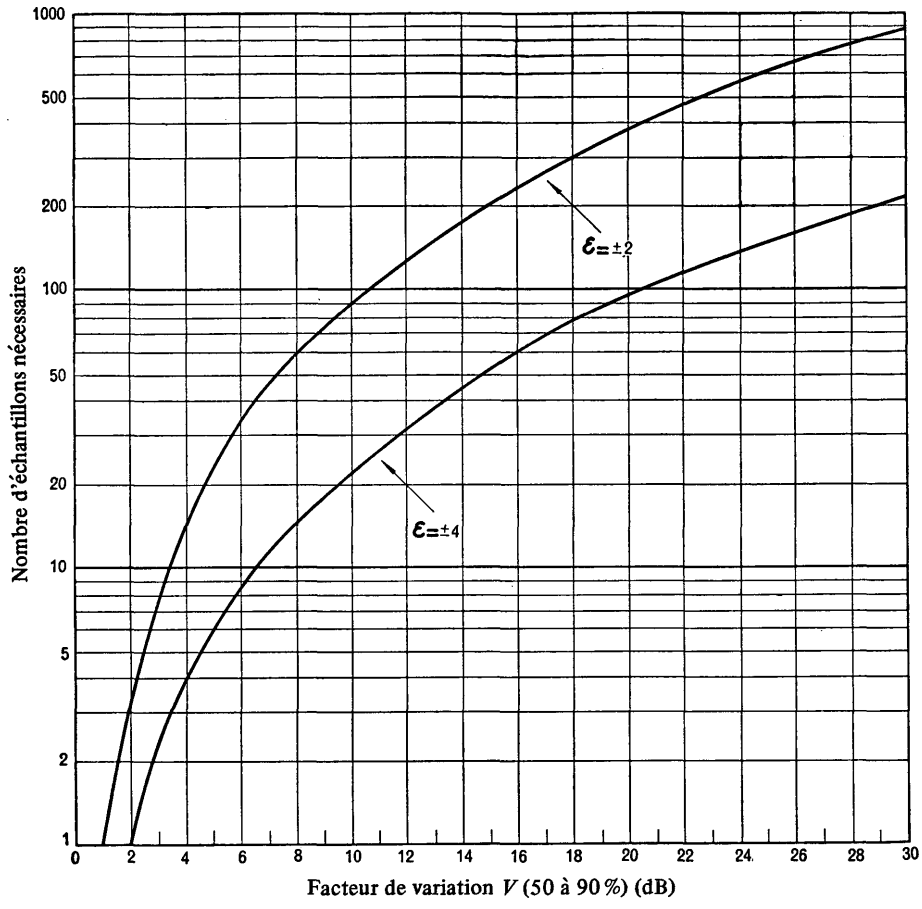



FIGURE 3 – *Nombre des mesures d'échantillonnage nécessaires afin de donner une probabilité de 95% pour que l'erreur, ε, sur la valeur médiane soit inférieure à 2 dB ou à 4 dB*

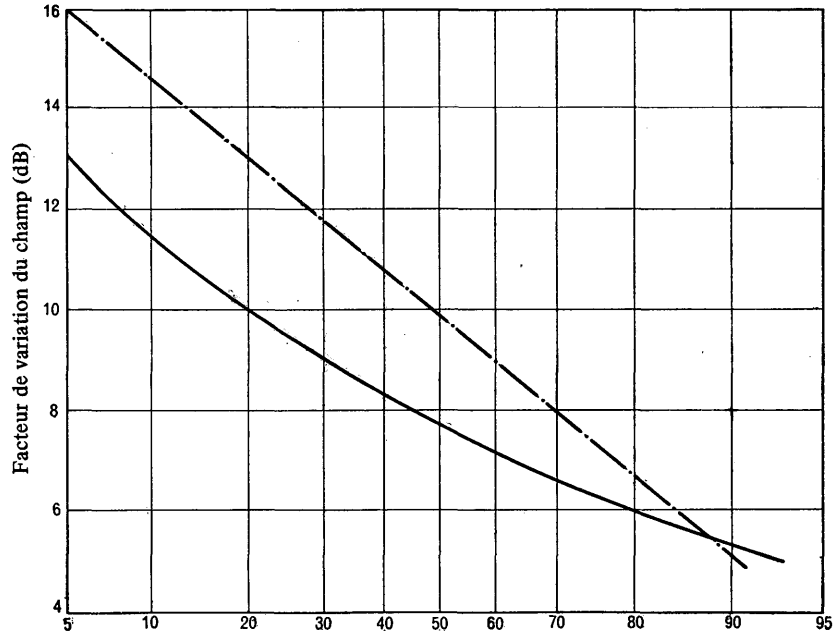



FIGURE 4 – *Distribution des valeurs du facteur de variation pour les villes du Royaume-Uni*

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

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 une antenne complètement sortie. Cependant, il est plus aisé de reproduire la moyenne d'une série de mesures qu'une observation sur un échantillon unique et l'on peut montrer que le nombre de mesures en série qui sont nécessaires pour évaluer le facteur de variation global avec une certaine précision, dans la zone considérée, est inférieur de quelque 10 à 15% au nombre de mesures sur «échantillon unique».

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

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

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

Les emplacements de mesure doivent être disposés sur des cercles ou sur des arcs de cercle centrés sur l'émetteur. Le choix des rayons de ces cercles dépend, dans une large mesure, des valeurs prévisibles de la caractéristique de zone. C'est pourquoi il est extrêmement utile d'estimer à l'avance la loi de variation de la caractéristique de zone en fonction de la distance pour le cas particulier considéré. La Fig. 5 donne un exemple de cette loi de dépendance basée sur une loi de variation du champ en fonction de la distance, pour un émetteur de télévision travaillant dans la bande de 54 à 88 MHz, et en admettant que les valeurs du champ dans les zones de mesure élémentaires sont distribuées suivant une répartition logarithmique normale avec un écart type de 6 dB. Les études de la propagation sur terrain accidenté à ces fréquences [FCC, 1949 et 1950; Kirby, 1957; Kirby et Capps, 1956; Kirby et autres, 1956; Kühn, 1958] montrent que le logarithme du champ obéit en première approximation à une répartition normale. Dans cet exemple, les valeurs de la caractéristique de zone fournissent le pourcentage de zones de mesures situées à la distance indiquée, dans lesquelles on peut prévoir que le champ dépassera 57 dB (par rapport à 1 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.

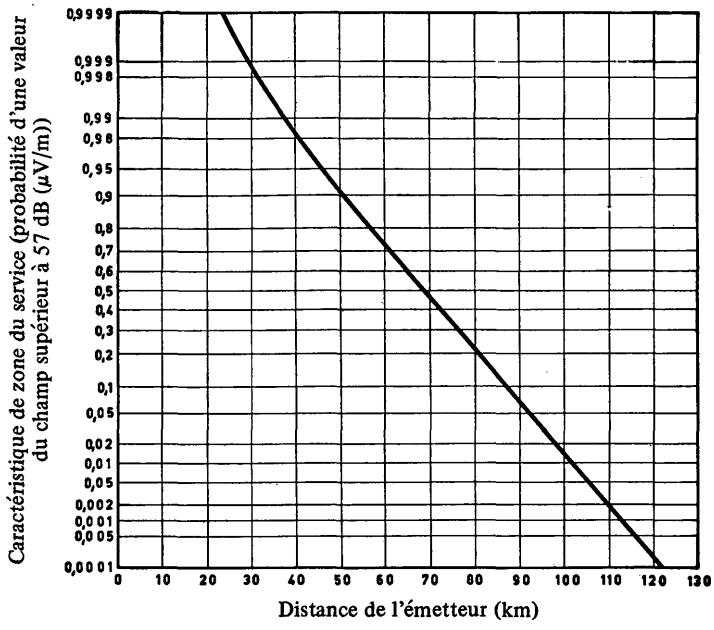



FIGURE 5 – *Variation de la caractéristique de zone du service en fonction de la distance à l'émetteur d'après la caractéristique de propagation typique d'une station de télévision d'une puissance apparente rayonnée de 100 kW fonctionnant dans la bande 54 à 88 MHz*

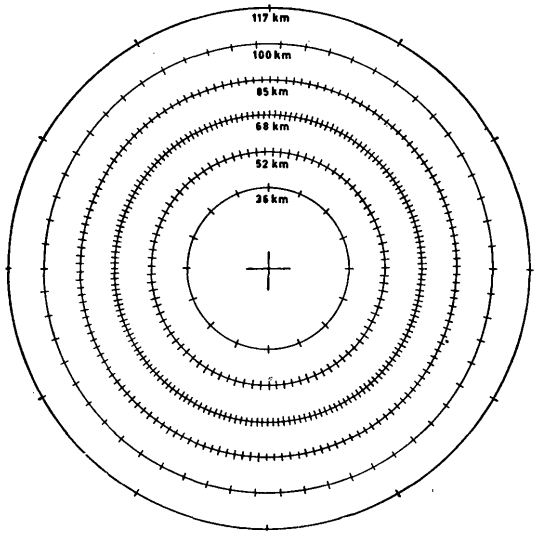



FIGURE 6 – *Disposition possible des emplacements de mesure pour une station de 100 kW dans des conditions moyennes de terrain*

(L'émetteur est au centre de la figure)

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

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

FCC [mai 1949 et 7 juillet 1950] Federal Communications Commission. Volumes I and II of the Report of the ad hoc Committee for the evaluation of the radio-propagation factors concerning the television and FM broadcasting services in the frequency range between 50 and 250 Mc/s. Mimeographs 36830 et 54382.

GENTILE, G. [juin 1966] Mesure de champ aux fréquences supérieures à 30 MHz. Méthode appliquée par le Centre de contrôle de la RAI à Monza. *Revue de l'UER*, 97-A.

KIRBY, R. S. [février 1957] Measurement of service area for television broadcasting. *Trans. IRE*, PGBTS-7, 23.

KIRBY, R. S. et CAPPS, F. M. [janvier 1956] Correlation in VHF propagation over irregular terrain. *Trans. IRE*, Vol. AP-4, 1, 77.

KIRBY, R. S., DOUGHERTY, H. T. et McQUATE, P. L. [juillet 1956] VHF propagation measurements in the Rocky Mountain Region. *Trans. IRE*, PGVC-6, 13.

KÜHN, U. [février et mai 1958] Ausbreitungsuntersuchungen über unterschiedlichem Gelände in den Frequenzbänden I, II und III (Recherches au sujet de l'effet des divers types de terrain dans les bandes I, II et III). *Tech. Mitt. BRF* (RDA).

NORTON, K. A., STARAS, H. et BLUM, M. [février 1952] Statistical approach to the problem of multiple radio interference to FM and television service. *Trans. IRE*, Vol. AP-1, 43.

TASO [mars 1959] Television Allocation Study Organization. Report to the Federal Communications Commission of Committee 5.3.

UER [1973] *Organes mobiles pour la mesure du champ et de la fréquence.* Monographie technique n° 3113.

---

RAPPORT 562-1 *

# DONNÉES DE PROPAGATION POUR LA RADIODIFFUSION SONORE ET LA TÉLÉVISION DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz

**Service de radiodiffusion de Terre à 12 GHz**

(Programme d'études 7B-1/5)

(1974 - 1978)

## 1. Introduction

En raison de la demande croissante de services de radiodiffusion dans les bandes inférieures à 1 GHz, il est nécessaire d'envisager l'utilisation de fréquences supérieures à 10 GHz, notamment dans la bande des 12 GHz, pour la radiodiffusion sonore et la télévision.

Le présent Rapport contient un avant-projet de description des effets de propagation dont il faut tenir compte lors de l'étude de réseaux fonctionnant dans la bande des 12 GHz. On y trouvera les résultats de mesures effectuées en République fédérale d'Allemagne, au Japon et en Suisse.

## 2. Considérations générales

### 2.1 *Propagation dans la zone de service*

L'élément le plus important à considérer quand on étudie un réseau de radiodiffusion est la probabilité de couverture, qui est fonction de l'affaiblissement dû à la diffraction par le terrain. Dans les bandes supérieures à 10 GHz, la diffraction par les bâtiments cause justement un affaiblissement particulièrement grand.

Il convient de tenir compte également de l'affaiblissement dû aux précipitations et à la propagation par trajets multiples. Des mesures faites en République fédérale d'Allemagne indiquent que dans les régions très urbanisées les effets des trajets multiples dus à la réflexion sur des couches atmosphériques sont d'une importance secondaire, alors que la propagation par trajets multiples due à la réflexion sur de grands bâtiments et les accidents de terrain mérite une attention particulière. La directivité relativement forte des antennes de réception utilisées pour les liaisons dans ces bandes de fréquences constitue peut-être un remède à ces difficultés.

### 2.2 *Brouillage causé dans d'autres zones de service*

Les caractéristiques de propagation dans les bandes supérieures à 10 GHz sont telles que la zone effectivement desservie par chaque émetteur est peu étendue, de sorte que, pour assurer la probabilité de couverture nécessaire, il faudra sans doute prévoir une grande densité d'émetteurs. Il est donc impérieux d'évaluer l'espacement minimal entre émetteurs fonctionnant dans le même canal. Cette estimation ne devrait pas être fondée uniquement sur un calcul des médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission; il faut considérer aussi les conditions de transmission anormales dans lesquelles le niveau du signal subit, sur de grandes distances, pendant de petits pourcentages du temps, un renforcement très sensible.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 10 et 11.

Si les conditions atmosphériques rendent possible la formation d'un conduit à la fréquence d'émission, le champ brouilleur peut alors s'accroître considérablement si l'antenne de la station se trouve dans le conduit. Bien que ces effets puissent être déterminés dans des cas particuliers par diverses méthodes [Dougherty et Hart, 1976], on a souvent avantage à appliquer une méthode générale fondée sur les probabilités, comme celle du Rapport 724, qui convient mieux en principe pour déterminer les distances de coordination; par contre, le calcul des espacements entre émetteurs partageant les mêmes fréquences relève plutôt des méthodes exposées dans le Rapport 569-1.

## 3. Données de propagation

### 3.1 *Propagation dans la zone de service*

On a effectué en République fédérale d'Allemagne [Sakowski, 1970a et b] des mesures de champ à 12 GHz environ au moyen d'un réseau expérimental de Berlin comprenant trois émetteurs, dont les antennes étaient montées à des hauteurs équivalentes différentes. Ces mesures indiquent que, pour remédier aux effets d'obstruction des bâtiments, il faut monter les antennes à des hauteurs adéquates. On a constaté qu'on aurait pu interpréter plus rationnellement les résultats obtenus dans le cas considéré, en rapportant la hauteur des antennes de réception, non au niveau du sol, mais au niveau moyen des toits au voisinage de chaque point de réception. [Sakowski, 1975] donne des valeurs du gain dû à la hauteur pour les hauteurs d'antenne de réception ainsi définies. Comme la relation entre le champ et la hauteur de l'antenne dépend beaucoup des dimensions des bâtiments d'une agglomération urbaine, on ne peut pas tirer des conclusions générales de ces mesures, qui ont été effectuées dans une ville où la hauteur des toits était relativement normalisée. Dans un grand nombre de mesures [Sakowski, 1977], on a aussi reconnu l'influence d'obstacles isolés. Les réflexions sur les bâtiments se sont révélées être accessoires étant donné que les affaiblissements dus à la réflexion étaient plus grands que prévu. Des arbres isolés se trouvant sur le trajet direct ont entraîné des affaiblissements qui pouvaient atteindre plusieurs dizaines de décibels et variaient rapidement avec le vent et beaucoup avec la saison, s'il s'agissait d'arbres à feuilles caduques. Dans les régions où l'effet d'écran était important, les affaiblissements mesurés à 12 GHz étaient supérieurs de 10 à 20 dB à ceux qui étaient mesurés à 600 MHz (ondes décimétriques). Des mesures prises simultanément en ondes à polarisations horizontale et verticale ont montré que l'influence de la polarisation sur l'affaiblissement dû aux obstacles est en général négligeable, sauf un léger avantage (de 4 dB en moyenne) pour les ondes à polarisation horizontale dans le cas de réflexions gênantes sur des surfaces verticales.

Dans cette expérience, la présence de trois émetteurs permettait d'évaluer l'avantage que présenterait une couverture triple. La conclusion a été que, sur un terrain relativement plat comme celui de la zone étudiée, le service assuré par un seul émetteur dont l'antenne était montée à 200 m au-dessus du sol n'était qu'un peu moins bon qu'avec une couverture triple, cette dernière solution étant d'ailleurs peu économique tant pour le coût des émetteurs que pour l'utilisation des fréquences.

Des mesures analogues du champ ont été effectuées en Suisse au moyen d'un émetteur à 12 GHz, dans l'agglomération de Berne et dans des zones plates ou montagneuses des environs [Bärfuss, 1976]. On a calculé, à partir des résultats obtenus, des pourcentages de couverture dans les différentes zones, dans les deux cas d'un système à modulation d'amplitude à bande latérale résiduelle et d'un système à modulation de fréquence.

Pour estimer l'affaiblissement dû aux précipitations ou à la propagation par trajets multiples à travers les couches atmosphériques, il convient de consulter les Rapports 720 et 338-3 (des données statistiques sur les affaiblissements pour le mois le plus défavorable ont également été obtenues au cours des expériences susmentionnées, effectuées en Suisse).

### 3.2 *Brouillage causé dans d'autres zones de service*

On a mesuré les champs brouilleurs créés dans les différents quartiers de Tokyo (Japon) par des ondes à polarisation horizontale ou circulaire à 12 GHz [Saito et autres, 1977]. Les résultats permettent de calculer les distributions des affaiblissements de transmission entre 5 et 10 km en fonction de la hauteur et du nombre de bâtiments situés autour des emplacements de réception; en outre, on constate qu'en utilisant des émissions à polarisation horizontale ou verticale plutôt qu'à polarisation circulaire on réduit les brouillages causés aux autres zones de service qui utilisent la polarisation orthogonale.

Le Rapport 569-1 contient la description de méthodes de calcul du champ ou de l'affaiblissement de transmission sur les distances à considérer pour évaluer les probabilités de brouillage à grande distance. S'il s'agit d'un projet de réseau à 12 GHz, on s'intéresse plus particulièrement aux distances inférieures à 300 km environ. Une comparaison de mesures faites en République fédérale d'Allemagne [Abel, 1972] avec les prévisions fondées sur [NBS, 1967] a montré que le champ s'affaiblit moins que prévu quand la distance s'allonge.

## 4. Conclusions

Ce Rapport récapitule les résultats préliminaires de mesures du champ faites dans un réseau expérimental à 12 GHz.

Il est évident qu'il faudra accroître beaucoup la masse de données disponible si l'on veut qu'elle puisse servir de base à l'étude des réseaux de radiodiffusion fonctionnant dans les bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABEL, N. [janvier 1972] Beobachtungen an einer 210 km langen 12-GHz-Strecke (Observations sur une liaison à 12 GHz longue de 210 km). Tech. Ber. des FI des FTZ, A 455 TBr 34.

BÄRFUSS, Chr. [1976] Propagation dans la bande des 12 GHz. *Bull. Tech. PTT Suisse*, Berne, N° 12, p.442-455.

DOUGHERTY, H. T. et HART, B. A. [1976] Anomalous propagation and interference fields. PB-262-477, NTIS, Springfield, Va. (Etats-Unis d'Amérique).

NBS [1967] National Bureau of Standards, Note technique N° 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

SAITO, T. et autres [septembre 1977] Propagation characteristics of the 12 GHz band in urban area. NHK Laboratories Note, Ser. N.215.

SAKOWSKI, K. [décembre 1970a] Mesure du champ sur le réseau expérimental de Berlin à 12 GHz. Techn. Ber. FTZ, A 44 TBr 22.

SAKOWSKI, K. [décembre 1970b] Probabilité des emplacements des émetteurs à 12 GHz dans le réseau expérimental de Berlin. Techn. Ber. FTZ, A 44 TBr 23.

SAKOWSKI, K. [février 1975] Die örtliche Feldstärkeverteilung bezogen auf die Haushöhen bei einer em-Wellen-Rundstrahlung (Distribution locale du champ par rapport à la hauteur des bâtiments dans le cas d'émissions omnidirectionnelles en ondes centimétriques). Tech. Ber. des FI der DBP beim FTZ, 454 TBr 21.

SAKOWSKI, K. [1977] Ausbreitungsdaten für eine Rundfunkversorgung im 12-GHz-Bereich (Données de propagation pour un service de radiodiffusion dans la bande des 12 GHz). *Rundfunktechnische Mitteilungen*, 21, H.2, 52-61.

---

## RAPPORT 565-1 *

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION POUR LA RADIODIFFUSION PAR SATELLITE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 10 GHz **

(Programme d'études 7B-1/5)

(1974 - 1978)

### 1. Introduction

Les problèmes que pose la radiodiffusion par satellite ne sont pas tout à fait les mêmes que ceux que l'on rencontre dans le service fixe par satellite. On a besoin de données sur l'affaiblissement sous la forme de moyennes statistiques pour de vastes régions. Des problèmes particuliers peuvent se présenter vers la limite de la zone de service ou encore si des systèmes de radiodiffusion par satellite sont coordonnés avec des services fixes de Terre ou spatiaux d'autre part. L'objet du présent Rapport est de rassembler des données pertinentes pour faciliter l'étude de systèmes de radiodiffusion par satellite.

### 2. Mesures de l'affaiblissement

A l'initiative de l'Agence spatiale européenne (ESA), une série de mesures radiométriques est en cours depuis 1972 en neuf emplacements d'Europe.

Il ressort clairement d'une campagne de mesures étendue sur trois ans qu'entre 20° et 45° l'angle de site n'a une éventuelle influence systématique sur les distributions de l'affaiblissement que bien inférieure aux variations annuelles de celles-ci et qu'on n'a pas pu constater son influence sur les valeurs de l'affaiblissement pendant le mois le plus défavorable.

TABLEAU I – *Affaiblissement observé à 11,5 GHz pendant le mois le plus mauvais en Europe*

| Nombre des mois les plus mauvais sur 31 mois | Affaiblissement non dépassé pendant | |
|---|---|---|
| | 99% du mois le plus mauvais d'une année civile | 99,9% du mois le plus mauvais d'une année civile |
| 28 (90%) | 1,6 dB | 6,4 dB |
| 16 (50%) | 1,1 dB | 3,2 dB |
| 3 (10%) | 0,8 dB | 1,6 dB |

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 10 et 11.

** Le présent Rapport contient des données sur l'affaiblissement. Des renseignements plus amples sur le «mois le plus défavorable» figurent dans le Rapport 723.

Le Tableau I donne les résultats obtenus pour un total de 31 distributions de l'affaiblissement pour les mois les plus mauvais d'années civiles [Brussaard, 1977]. Ces valeurs se rapportent à la partie européenne de la Région 1. La période de mesures correspondante n'atteint pas encore 10 ans (cette durée serait souhaitable du point de vue météorologique), mais on peut considérer que les valeurs en regard de «50%» caractérisent une année moyenne et que les valeurs en regard de «90%» caractérisent l'année la plus défavorable sur une période de 10 ans.

Dans la Région 3, des mesures radiométriques ont été faites avec héliostat à Tokyo (Japon) et à Klang (Malaisie) [Kinase et Kimpara, 1973].

TABLEAU II – *Affaiblissement observé à 11,8 GHz pendant le mois le plus défavorable à Tokyo et Klang*

| Lieu de mesure | Période | Affaiblissement non dépassé pendant | |
|---|---|---|---|
| | | 99% du mois le plus défavorable d'une année normale | 99,9% du mois le plus défavorable d'une année normale |
| Tokyo | 1967-1973 | 0,9 dB | 4,2 dB |
| Klang | oct. 1970-nov. 1972 | 1,7 dB | 8,7 dB |

Les résultats consignés au Tableau II ont été rapportés à un angle de site de 45° par application de la loi de la cosécante.

## 3. Renseignements supplémentaires

Pour de petits angles de site (moins de 20°), l'affaiblissement peut être parfois supérieur aux valeurs indiquées dans le Tableau I. Le Rapport 564-1 contient des renseignements pour évaluer l'affaiblissement sur des trajets obliques, pour toutes les régions du monde et pour différents angles de site.

L'influence de la fréquence sur l'affaiblissement dû à la pluie est traitée dans le Rapport 721.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRUSSAARD, G. [1977] Rain attenuation on satellite-Earth paths at 11.4 and 14 GHz. Proc. URSI Symposium, La Baule, France, 28 avril – 6 mai (publié par CNET, France).

KINASE, A. et KIMPARA, A. [octobre 1973] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Ser. No.171.

SECTION 5E: ASPECTS RELATIFS AU SERVICE FIXE DE TERRE

*Avis et Rapports*

RAPPORT 338-3 *

# DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE

(Programme d'études 5A-3/5)

(1966 - 1970 - 1974 - 1978)

## 1. Introduction

Vu la grande importance de la propagation sur des trajets en visibilité directe dans la réalisation de faisceaux hertziens dans toutes les parties du monde, toutes les administrations ont été invitées à soumettre d'autres données se rapportant à ce sujet, en plus de celles qui ont été accumulées en grand nombre jusqu'à ce jour et des renseignements pertinents. En attendant, on fournit dans ce Rapport des renseignements généraux additionnels sur la propagation, qui pourront servir de base aux réalisateurs de faisceaux hertziens à visibilité directe. Notamment, l'étude statistique de nombreux enregistrements de l'affaiblissement de transmission a permis l'établissement de courbes de propagation générales.

Il existe certains faisceaux hertziens fonctionnant sur des fréquences inférieures à 1 GHz, mais le CCIR ne possède pas actuellement suffisamment de données concernant les caractéristiques de propagation pertinentes. On n'est donc pas en mesure de présenter des courbes typiques. C'est pourquoi ce Rapport traite donc principalement des fréquences supérieures à 1 GHz.

## 2. Tracé du trajet

Pour des trajets en visibilité directe on utilise le modèle à deux rayons montré dans la Fig. 1. Un rayon terrestre apparent, $a_e$ (= *ka*), est utilisé à la place du rayon réel, *a*, pour tenir compte de la réfraction moyenne des rayons radioélectriques. Consulter le Rapport 718 sur les effets de la réfraction atmosphérique.

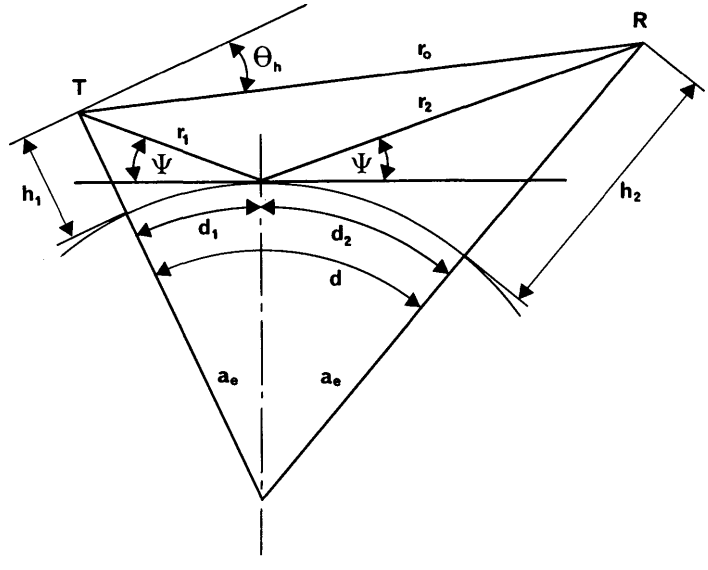



FIGURE 1 – *Relations géométriques pour des trajets de propagation en deçà de l'horizon*

Pour une surface lisse et parfaitement conductrice, l'affaiblissement, par rapport à l'espace libre, du signal reçu (composé de l'onde directe et de l'onde réfléchie sur le sol) est donné par:

$$A = -6 - 10 \log \sin^2 (\pi \Delta r/\lambda) \quad \text{dB} \qquad (1)$$

où $\lambda$ est la longueur d'onde radioélectrique et $\Delta r = r_1 + r_2 - r_0$ est la différence de longueur entre les trajets des rayons.

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

$$\Delta r \approx 2h'_1 h'_2/d \qquad (2)$$

où $h'_1$ et $h'_2$ désignent les hauteurs des antennes au-dessus d'un plan tangent à la surface terrestre au point de réflexion.

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 9.

Soit $\theta_h$ 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 $h_1 \leqslant h_2$, $h_1 \leqslant (9a_e \psi^2)/2$ et, d'autre part, que $\psi$ est petit. On a alors:

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

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

Dans le cas où les antennes sont placées à la même hauteur au-dessus d'une terre sphérique de rayon apparent $a_e$:

$$\Delta r = d(\sec \psi - 1) \quad (4)$$

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

$$2h_1^2/d_0 - h_1 d_0/(2a_e) + d_0^3/(32a_e^2) = \lambda/6 \quad (5)$$

la somme des champs de l'onde directe et de l'onde réfléchie au sol devant être égale au champ en espace libre.

## 3. Dégagement du trajet

Les changements de conditions atmosphériques entraînent des variations du rayon terrestre apparent, c'est-à-dire du facteur $k$. Lorsque l'atmosphère est caractérisée par une infraréfraction suffisante (valeurs positives élevées du gradient de l'indice de réfraction: faibles valeurs du facteur $k$), les rayons sont courbés de telle manière que la terre paraît se trouver sur le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, ce qui donne lieu à un genre d'évanouissement appelé évanouissement par diffraction. On peut atténuer ce type d'évanouissement en installant des antennes à une hauteur suffisante pour que, dans des conditions de courbure très accentuée des rayons, le récepteur ne se trouve pas dans la région de diffraction.

Pour les faisceaux hertziens à visibilité directe, la théorie de la diffraction indique que le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur doit être dégagé de tout obstacle à partir d'une hauteur au-dessus du sol au moins égale à 60% du rayon de la première zone de Fresnel, pour que les conditions de propagation en espace libre soient réalisées. Il convient également de prévoir une marge pour tenir compte d'une infraréfraction éventuelle; on le fait habituellement en s'assurant que le dégagement requis existe, même lorsque le rayon terrestre fictif est inférieur à sa valeur normale. Par exemple, aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni, les réalisateurs de faisceaux hertziens exigent souvent un dégagement égal à 60% du rayon de la première zone de Fresnel, même lorsque le rayon terrestre apparent est de 4500 km seulement ($k = 0{,}7$). Toutefois, une analyse, faite au Royaume-Uni, 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 apparent a sa valeur normale de 8500 km ($k = 1{,}33$). Ce dégagement est généralement inférieur à celui qui est exigé aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni. Des mesures effectuées en République fédérale d'Allemagne ont montré que le dégagement total de la première zone de Fresnel avec $k = 4/3$ (50% du temps) n'est pas suffisant pour éviter les évanouissements de diffraction dans le cas de trajets de longueurs supérieures à 100 km. Le trajet direct doit être en plus libre de tout obstacle pour $k = 1$ (99% du temps en République fédérale d'Allemagne).

Dans les cas où l'on dispose de statistiques relatives aux conditions d'infraréfraction, on peut remplacer éventuellement cette règle élémentaire par une méthode plus précise tenant compte de l'indice réel d'infraréfraction que l'on peut s'attendre à rencontrer dans diverses régions.

En résumé, il est largement démontré qu'un dégagement correspondant à 60% de la première zone de Fresnel, pour un rayon terrestre apparent de 4500 km, est bien suffisant pour éviter les évanouissements dus à l'infraréfraction. Cependant, il se peut qu'en certaines circonstances un dégagement moins important soit suffisant, et parfois même avantageux, sur des terrains présentant des conditions propices à la réflexion. Toutefois, on ne dispose malheureusement pas encore d'éléments suffisants pour suggérer dans quelle mesure le dégagement pourrait être réduit avec sécurité.

Il y a cependant lieu de souligner que, pour ce qui est de la propagation des ondes, les valeurs extrêmes du gradient de l'indice de réfraction mesurées en un point sont moins importantes qu'on pourrait le supposer. Ces valeurs extrêmes correspondent à des conditions atmosphériques inhabituelles qui règnent sur une distance probablement très courte et en général inférieure à la longueur de la liaison radioélectrique. Il convient donc de considérer également la corrélation dans l'espace des gradients de l'indice de réfraction en deux points du trajet, mais cette question n'a pas été suffisamment étudiée. Le gradient de l'indice de réfraction mesuré en un point (et surtout ses valeurs extrêmes) ne doit donc être utilisé qu'avec une grande prudence.

On a démontré qu'une valeur effective minimale de $k$ peut être déduite en fonction de la longueur du trajet pour un climat tempéré continental, comme le montre la Fig. 2 [Boithias et Battesti, 1967].

On trouvera dans le Rapport 718 des exemples de mesures du gradient de l'indice de réfraction, effectuées dans un certain nombre de pays.

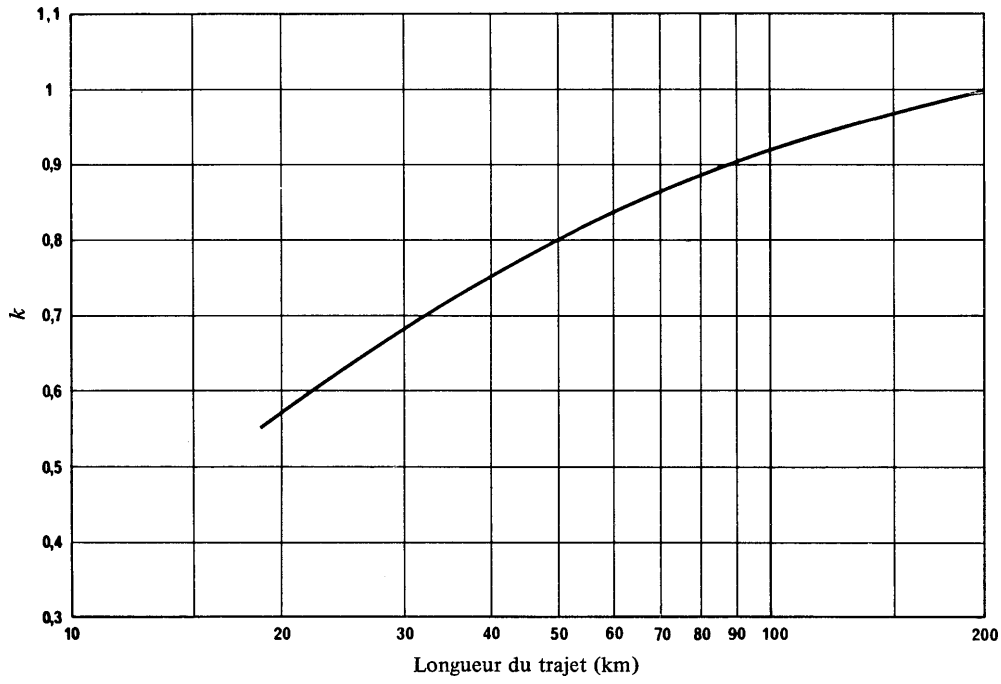



FIGURE 2 – *Valeur minimale de k dépassée durant approximativement 99,9% du temps (Climat tempéré continental)*

## 4. Variations de l'angle d'arrivée

Une variation de l'indice de réfraction atmosphérique peut causer des changements dans l'angle apparent d'arrivée du rayon direct, en particulier dans le plan vertical, et peut donc, en principe, causer une réduction du gain des antennes utilisées aux extrémités du trajet radioélectrique.

Des mesures faites en Angleterre [Bell, 1967] à la fréquence 11 GHz sur un trajet de 55 km n'ont pas montré, pendant une période d'une année, de variations supérieures à ± 7 minutes d'arc.

Des mesures faites en République fédérale d'Allemagne, à la fréquence 515 MHz, sur un trajet de 70 km, ont donné des résultats sensiblement du même ordre.

Cependant, des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [Crawford et Jakes, 1952] 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° au-dessus et au-dessous 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'arrivée mesurées pour plusieurs trajets radioélectriques au Japon concordent assez bien avec les variations prévues d'après les données statistiques radiométéorologiques relatives à $\Delta N$ et à $\sigma_{\Delta} N$ dans le premier kilomètre de la couche, et d'après l'épaisseur $\Delta H$ de la couche au-dessus de laquelle se propagent les ondes [Ikegami et autres, 1968].

## 5. Evanouissements dus aux trajets multiples *

### 5.1 *Généralités*

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.

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 quand il y a deux composantes effectives, du même ordre d'amplitude. Des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [Crawford et Jakes, 1952] ont montré qu'il peut exister jusqu'à six composantes à la fois.

Les mesures de propagation par trajets multiples effectuées au Japon [Nomura et autres, 1967] montrent que la plupart des évanouissements profonds sont causés par des interférences entre deux rayons dominants et que la différence de longueur entre les trajets de ces rayons varie considérablement selon les conditions qui règnent sur le trajet de propagation. Des différences maximales de 2 m et 20 cm ont été observées respectivement sur un trajet maritime et sur un trajet terrestre. Le rapport d'amplitude entre les rayons multiples variait rapidement entre des limites étendues, ce qui donne une densité de probabilité presque uniforme. On a mis au point, et vérifié expérimentalement, une méthode qui permet d'évaluer les caractéristiques de propagation par trajets multiples en se fondant sur la probabilité d'évanouissements.

---

* Aux fréquences approximativement supérieures à 10 GHz, les évanouissements dus aux hydrométéores peuvent être plus importants que ceux dus aux trajets multiples. Voir § 6.

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. 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 [Giuglia-relli, 1965] ont montré qu'il était très difficile de réaliser la transmission de signaux complexes (télévision en couleur, par exemple) si le plan d'eau n'était pas entièrement invisible de l'une des extrémités au moins.

Dans des conditions normales et sur des trajets maritimes ou des trajets terrestres comportant relativement peu d'irrégularités, on peut s'attendre qu'une partie de l'onde réfléchie au sol soit diffusée hors du trajet de propagation [NBS, 1967]. Cependant, dans des conditions de superréfraction atmosphérique et lorsque la terre paraît concave, l'onde réfléchie est renforcée du fait de la convergence des rayons associés. Des élévations de 12 dB au-dessus du niveau en espace libre ont été observées plusieurs fois [Mogensen, 1977].

Des essais faits en République fédérale d'Allemagne 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 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.

### 5.2 *Profondeur des évanouissements*

L'étude faite au Royaume-Uni des 27 sections de faisceaux hertziens – 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 du temps dépend, en première approximation, de la longueur du trajet et du type de terrain traversé; mais elle dépend assez peu de la fréquence, dans la gamme comprise entre 2 et 6 GHz.

En revanche, des travaux effectués en France [Battesti et Boithias, 1964], sur des trajets de plus de 100 km, montrent que les évanouissements dépendent dans une faible mesure seulement 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. 3 des courbes provisoires fondées sur les résultats obtenus au Royaume-Uni et en France. Ces courbes donnent la distribution des profondeurs d'évanouissement par rapport à la propagation en espace libre pendant le mois le plus défavorable de l'année, pour diverses longueurs de trajets 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 applique ces courbes provisoires dans des conditions différentes, en ce qui concerne le climat, le terrain ou le dégagement du trajet.

En République fédérale d'Allemagne, on a trouvé la même loi de distribution pour l'affaiblissement par rapport à l'espace libre pendant le mois le plus défavorable, sur six trajets différents, bien que les distances variaient de 69 à 142 km et les fréquences de 2 à 7 GHz. Cette loi de distribution correspond à la courbe 75 km de la Fig. 3. Dans tous les cas la première zone de Fresnel était dégagée pendant au moins 50% du temps et le trajet direct était en plus libre de tout obstacle pendant 99% du temps. Cette distribution statistique semble être une distribution limite pourvu que les conditions de dégagement mentionnées ci-dessus soient satisfaites. Il y a peut-être une légère influence des conditions climatiques.

Les corrections de première approximation, pour 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. 3 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. 3 d'une valeur variant d'environ 1 dB pour 50 km à 6 dB pour 250 km. Des mesures effectuées en Italie à 2 GHz sur une liaison mixte Terre-mer de 300 km ont donné des résultats en bon accord avec la Fig. 3, compte tenu des corrections en fréquence et en distance [CCIR 1974-78a].

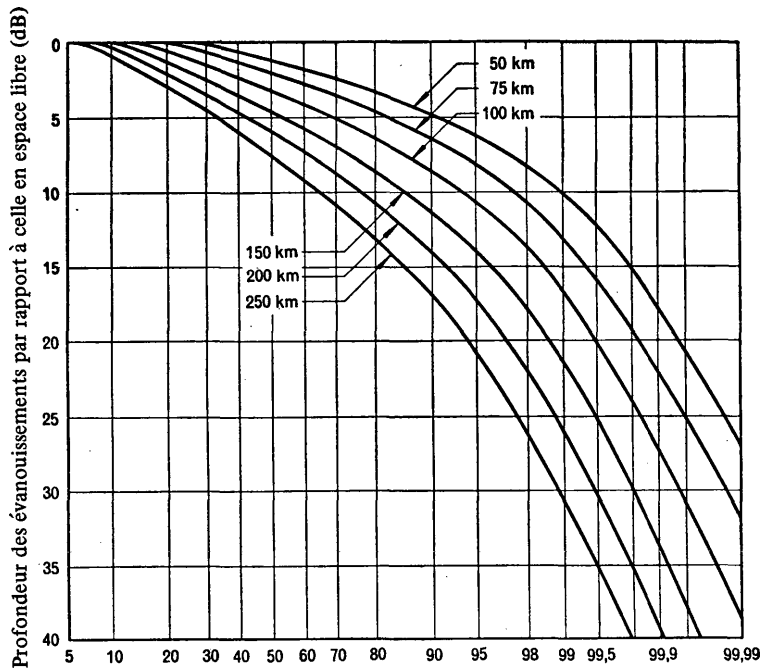



FIGURE 3 – *Courbes provisoires de la profondeur des évanouissements qui n'est pas dépassée pendant un pourcentage donné du mois le plus défavorable; 4 GHz; terrain vallonné moyen; nord-ouest de l'Europe*

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. 3 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. 3. Des mesures faites aux Pays-Bas à 7 GHz ont montré que, dans une région plate et humide, on peut observer des évanouissements encore plus profonds. Les observations faites sur un trajet de 100 km, à la fréquence de 6 GHz, ont montré que des évanouissements très profonds peuvent se produire même au-dessus d'un terrain accidenté.

Des mesures faites aux environs de Dresde sur un trajet de 56 km ont montré que, dans cette région, les profondeurs des évanouissements à 8 et à 11 GHz étaient peu différentes. La profondeur des évanouissements à 11 GHz entre 50 et 99,9% du temps atteignait une valeur moyenne annuelle de 24 dB. Elle était seulement d'environ 21 dB à 8 GHz. Les variations journalières et saisonnières des évanouissements sont analogues aux valeurs mentionnées par différents auteurs pour des fréquences plus basses.

Pour la construction de faisceaux hertziens conformes aux Avis du CCIR, il faut déterminer la probabilité d'apparition d'évanouissements profonds pendant de très petits pourcentages du temps (0,0002% environ, par exemple, pour un bond moyen de l'ordre de 50 km). Afin de surmonter des difficultés que l'on pourrait rencontrer pour estimer la profondeur des évanouissements pour de si petits pourcentages du temps, on a mis au point une méthode fondée sur la probabilité d'apparition d'évanouissements de type Rayleigh [Morita, 1970]. Cette méthode s'applique aux trajets dégagés à visibilité directe, avec une réflexion négligeable sur la surface terrestre. La probabilité d'apparition d'évanouissements, *Pr*, répond alors à la formule:

$$Pr\,(W) = K \cdot Q \cdot \frac{W}{W_0} \cdot f^B \cdot d^C \qquad (6)$$

où

*d*: longueur du trajet (km)

*f*: fréquence (GHz)

*K*: dépendant du climat

*Q*: dépendant du terrain

$W_0$: puissance reçue en l'absence d'évanouissement

*Pr(W)*: probabilité pour que la puissance reçue soit égale ou inférieure à *W*.

Cette formule s'applique uniquement aux évanouissements d'une profondeur supérieure à 15 dB environ.

Au Japon, on a constaté que les valeurs ci-après seraient acceptables pour la saison la plus défavorable:

$$\left.\begin{aligned} B &= 1{,}2 \\ C &= 3{,}5 \\ K &= 0{,}97 \times 10^{-9} \\ Q &= 0{,}4 \quad \text{(au-dessus de montagnes)} \\ &= 1{,}0 \quad \text{(au-dessus de plaines)} \\ &= \frac{72}{\sqrt{\frac{h_1 + h_2}{2}}} \quad \text{(au-dessus de la mer ou du littoral)} \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

où $h_1$ et $h_2$ sont exprimés en mètres.

Une méthode a été mise au point au Japon [Morita, 1972] pour estimer les affaiblissements de type Rayleigh dans le cas où la réflection sur le sol n'est pas négligeable.

Pour la partie nord-ouest de l'Europe, on a trouvé que les valeurs suivantes sont acceptables pour le mois le plus défavorable:

$$\left.\begin{aligned} B &= 1 \\ C &= 3{,}5 \\ K &= 1{,}4 \times 10^{-8} \\ Q &= 1 \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Aux Etats-Unis, dans beaucoup de régions climatiques décrites dans l'annexe du Rapport 238-3, on a trouvé les valeurs suivantes pour une distribution cumulative selon Rayleigh des évanouissements dus à des trajets multiples, pendant le mois le plus défavorable [Barnett, 1972a; Vigants, 1975]:

$$\left.\begin{aligned} B &= 1 \\ C &= 3 \\ K &= 1{,}2 \times 10^{-6} && \text{pour un climat équatorial, maritime tempéré, méditerranéen ou côtier et pour des régions climatiques à forte humidité et température élevée,} \\ &= 9 \times 10^{-7} && \text{pour un climat intertropical maritime,} \\ &= 6 \times 10^{-7} && \text{pour un climat continental tempéré et pour des régions climatiques intérieures de latitude moyenne,} \\ &= 3 \times 10^{-7} && \text{pour des climats polaires et pour des régions climatiques sèches de haute montagne,} \\ Q &= (15{,}2/S)^{1{,}3} && S \text{ étant l'irrégularité du terrain mesurée, en mètres, par l'écart type des hauteurs du terrain relevées à des intervalles de 1 km,} \\ Q &= 3{,}35 && \text{pour un terrain régulier (limite supérieure, où } S \geqslant 6 \text{ m),} \\ &= 1{,}0 && \text{pour un terrain moyen (cas où } S = 15{,}2 \text{ m),} \\ &= 0{,}27 && \text{pour un terrain irrégulier (limite inférieure, où } S \leqslant 42 \text{ m).} \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

*Note.* – Ces valeurs s'appliquent à des régions déterminées et ont été établies pour différents dégagements du trajet; des précautions devront être prises si on les applique à des régions autres que celles pour lesquelles elles ont été établies.

En U.R.S.S., une méthode a été mise au point pour le calcul de la distribution 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.

D'après la Fig. 3 [CCIR, 1974-78b], pour le nord-ouest de l'Europe, on peut représenter l'affaiblissement non dépassé pendant 80% du temps par la formule suivante:

$$A = 10 \log\left(1 + \frac{d^2 \cdot f^{0{,}8}}{8500}\right) \quad (10)$$

où

$A$: affaiblissement (dB)

$d$: longueur du trajet (km)

$f$ : fréquence (GHz).

Pour les fréquences supérieures à 12 GHz, il est nécessaire de tenir compte en outre de l'affaiblissement par la vapeur d'eau et par l'oxygène.

5.3 *Durée des évanouissements*

La distribution de la durée des évanouissements influence le choix des systèmes de protection par diversité ou les circuits d'horloge des systèmes numériques. Des mesures faites en U.R.S.S. ont montré que la distribution statistique de la durée des évanouissements obéit en première approximation à la loi log-normale. La médiane de la durée des évanouissements varie en sens inverse de leur profondeur et de la longueur du trajet; elle augmente avec le dégagement relatif du trajet. L'écart type varie en sens inverse de la profondeur des évanouissements et augmente légèrement avec la fréquence; il dépend peu des caractéristiques géométriques du trajet et des conditions atmosphériques.

Des mesures faites aux Etats-Unis montrent que la distribution de la durée des évanouissements pour des liaisons sans diversité suit une loi log-normale caractérisée par un écart type de 5,6 dB. Des mesures effectuées à long terme aux Etats-Unis [Bullington, 1971; Lin, 1974; Vigants, 1971] sur des liaisons à visibilité directe de 40 à 70 km ont montré que la médiane $< t >$ de la durée des évanouissements dus à des trajets multiples peut être exprimée, pour un signal sans diversité, de la manière suivante:

$$< t > = 56{,}6 \times 10^{-F/20} \times \sqrt{\frac{d}{f}} \qquad (11)$$

où

$d$: longueur du trajet (km)

$f$: fréquence (GHz)

$F$: profondeur d'évanouissement (dB) dépassant 20 dB

$< t >$: médiane de la durée (s) pour une profondeur d'évanouissement $F$.

5.4 *Vitesse de variation des évanouissements*

Peu de données concernant les statistiques de la vitesse de variation des évanouissements sont disponibles. On en a besoin principalement pour étudier la réception en diversité avec commutation.

Sur un trajet terrestre de 45 km au Danemark, à 14 GHz [Mogensen, 1977], des vitesses d'évanouissement atteignant 30 dB/s ont été mesurées avec un échantillonnage toutes les secondes. La vitesse de variation dépendait du niveau mais pas de la fréquence dans la bande des 1 GHz. Des résultats semblables ont été obtenus aux Etats-Unis [Bullington, 1971] à 4 et 6 GHz.

5.5 *Réception en diversité*

La propagation par trajets multiples donne des évanouissements de profondeur maximale lorsque l'on a affaire à deux composantes effectives ayant la même amplitude. 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 [Lewin, 1962].

Sur les trajets courts passant au-dessus de plans d'eau, les effets de diversité peuvent être représentés par un modèle à deux rayons. Sur les trajets plus longs, on pourra être obligé d'employer la réception en diversité tant sur les trajets terrestres que sur les trajets passant au-dessus de plans d'eau, bien que le modèle à deux rayons ne soit plus applicable. On a mis au point des méthodes permettant de déterminer l'espacement des antennes ou la séparation entre fréquences nécessaire pour protéger la réception en diversité contre les évanouissements profonds. Certaines méthodes [Lewin, 1962; Norton et autres, 1965], fondées sur un modèle à deux rayons, qui tirent parti de la variation mesurée du gradient de l'indice de réfraction au voisinage de la surface terrestre, supposent que le signal reçu se compose d'une onde directe et d'une onde réfléchie d'amplitudes approximativement égales, mais dont les phases varient en fonction du gradient de l'indice de réfraction. Une méthode applicable à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère a été mise au point au Japon; des vérifications expérimentales ont été effectuées.

Des études effectuées en France et en Italie indiquent qu'un espacement vertical de 150 longueurs d'onde est souhaitable pour réduire les évanouissements dus aux trajets multiples dans l'atmosphère. Des mesures effectuées en République fédérale d'Allemagne montrent que la corrélation entre les signaux ne décroît pas de façon monotone avec l'espacement entre les antennes et qu'on doit en tenir compte pour exprimer l'espacement optimal de diversité en longueurs d'onde.

En Italie, 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 modèles ont été mis au point [Vigants, 1975; Fehlhaber, 1976], qui montrent comment, pour éviter des évanouissements excessifs en propagation par trajets multiples, on peut utiliser des stations terminales suffisamment dénivelées.

Des mesures en diversité de fréquence, faites sur 2,5 GHz en République fédérale d'Allemagne et sur 2 GHz en Italie, 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 près de Dresde sur un trajet de 56 km à 11 GHz ont montré que la diversité de fréquence avec des fréquences espacées de 240 MHz fournissait une amélioration de 5 dB seulement pendant 99,9% du temps. On a mis au point un modèle [Barnett, 1970] qui montre comment l'emploi d'un espacement de fréquence suffisamment grand permet de réduire les évanouissements dus aux trajets multiples.

Des mesures effectuées par l'Administration française à 6 GHz, sur un trajet de 106 km de longueur situé dans la République Fédérale du Cameroun, 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.

De nombreuses mesures expérimentales effectuées par plusieurs administrations [Boithias et Battesti, 1967] ont permis de tracer les courbes de la Fig. 4, 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 importantes et pour des fréquences comprises entre 2 et 10 GHz environ. Pour des fréquences inférieures, l'amélioration serait probablement un peu meilleure. Pour la diversité d'espace, l'espacement vertical entre les antennes est supposé supérieur à environ 150 longueurs d'onde.

Des mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique [McGavin et autres, 1970] ont permis de comparer l'efficacité de la diversité de fréquence et de la diversité d'espace. Elles ont mis en évidence le fait que les méthodes couramment suivies pour les projets de liaisons dont le trajet survole la mer ou un terrain régulier ne conviennent pas, en général, au cas où le trajet survole un terrain irrégulier.

## 6. Affaiblissement dû aux hydrométéores *

### 6.1 *Généralités*

La propagation des ondes à hyperfréquences à travers l'atmosphère s'accompagne d'un affaiblissement, qui est dû à l'absorption et à la diffusion par les hydrométéores (pluie, grêle, neige et brouillard). Cet affaiblissement, généralement négligeable au-dessous de 5 GHz, peut devenir considérable aux fréquences plus élevées. Par conséquent, lorsqu'on fait le projet de faisceaux hertziens destinés à fonctionner dans ces bandes, l'affaiblissement dû aux hydrométéores est un facteur dont l'importance augmente avec la fréquence, les hydrométéores pouvant même finir par constituer la source d'affaiblissement dominante. Le Rapport 563-1 donne une description sommaire des caractéristiques et de l'étendue des précipitations.

Pour les fréquences auxquelles l'affaiblissement dû à la pluie n'est pas négligeable, il existe un pourcentage du temps, dépendant du climat et de la fréquence, pour lequel l'affaiblissement dû à la pluie est plus grand que celui dû aux trajets multiples. Pour les pourcentages du temps d'intérêt pratique au Royaume-Uni et aux Pays-Bas [Turner et autres, 1966; Bell, 1967; Harden et Turner, 1973; Hewitt et Norbury, 1973; Morita, 1971], l'affaiblissement dû aux précipitations à 11 ou 12 GHz n'est pas un facteur prépondérant, sur une base aussi bien mensuelle que annuelle; dans les expériences du Royaume-Uni décrites ci-dessous, la propagation par trajets multiples était la cause principale des évanouissements profonds à 11 GHz sur les liaisons les plus longues, tandis que les fortes pluies étaient le facteur dominant à 37 GHz sur les liaisons les plus courtes; à 20 GHz, les évanouissements dus aux trajets multiples et l'affaiblissement dû aux précipitations étaient d'importance comparable. Au Japon, l'affaiblissement dû aux précipitations était prépondérant au-dessus de 10 GHz. En République fédérale d'Allemagne, on a trouvé que, pour des fréquences comprises entre 9 et 12 GHz et des longueurs de trajet comprises entre 25 et 70 km, l'un ou l'autre type d'évanouissement pouvait être prépondérant.

Comme les trajets multiples apparaissent surtout lorsque l'atmosphère est stratifiée, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de précipitations intenses, il suffit d'ajouter les pourcentages correspondant à ces deux causes d'évanouissements.

Bien qu'il convienne de considérer ces résultats comme n'ayant qu'un caractère provisoire – en l'attente de renseignements plus détaillés sur les caractéristiques des précipitations intenses – ils peuvent déjà fournir une indication sur la possibilité d'une réalisation pratique de faisceaux hertziens.

### 6.2 *Profondeur des évanouissements*

Les affaiblissements dus aux précipitations, aux fréquences supérieures à 10 GHz, sont étudiés dans le Rapport 720; ce Rapport contient aussi un résumé des méthodes dont on dispose actuellement pour établir des statistiques des affaiblissements. De nombreuses administrations ont effectué des mesures d'affaiblissement à diverses fréquences et diverses distances. Des mesures ont montré que la variabilité d'une année à une autre est grande, particulièrement pour les faibles pourcentages du temps.

En ce qui concerne les fréquences inférieures à 50 GHz, on trouvera des résultats de mesure dans [Hickin, 1968; Blevis et autres, 1967; Mogensen, 1977]. Des expériences faites en France à 13 GHz sur un trajet de 53 km [Fimbel et autres, 1976; CCIR, 1974-78c] et en Italie à 17,8 GHz sur un trajet de 9,5 km [Fedi et autres, 1977; Fedi et autres, 1978] ont montré que la pluie affaiblit beaucoup plus les ondes à polarisation horizontale que les ondes à polarisation verticale.

---

* Pour les évanouissements par trajets multiples, voir le § 5.

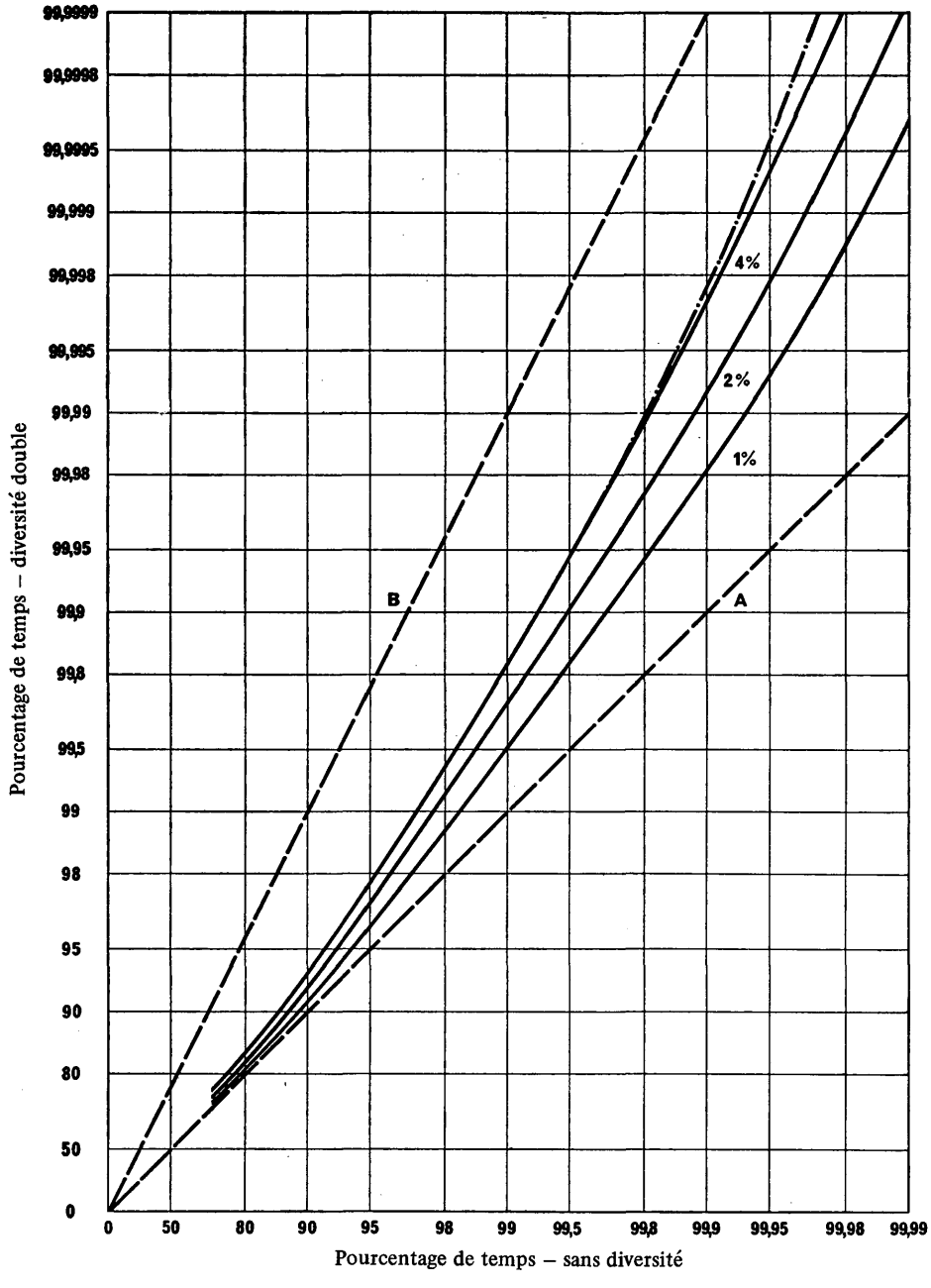



FIGURE 4

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

En France, on a trouvé que le rapport des affaiblissements respectivement en polarisation verticale et en polarisation horizontale sur une liaison à 13 GHz était en moyenne de 0,75 pour les affaiblissements profonds. Dans d'autres pays, ce rapport peut être plus proche de 1.

En Italie, les profondeurs des affaiblissements étaient d'autant plus différentes qu'elles étaient grandes et atteignaient des valeurs de 15 dB environ pour un affaiblissement de 40 dB mesuré en polarisation verticale.

Des mesures, effectuées au Royaume-Uni sur une période de deux années [Harden et Turner, 1973; Hewitt et Norbury, 1973] à 11,20 et 37 GHz sur des liaisons de 4 à 22 km, montrent que l'affaiblissement dû à la pluie et aux trajets multiples qui était dépassé pendant 0,01% du temps et moins augmentait rapidement avec la longueur du trajet jusqu'à environ 10 km, mais qu'en la portant à 22 km on n'obtenait qu'un petit effet supplémentaire. Des données pluviométriques ont été recueillies aussi sur une batterie de pluviomètres à réponse rapide placés sur une des liaisons de 8 km; les valeurs de l'affaiblissement calculées à partir de l'intensité moyenne de précipitation sur le trajet, en utilisant une distribution des dimensions des gouttes de Laws et Parsons, étaient en bon accord avec les résultats des mesures effectuées sur cette même liaison.

Des distributions cumulatives de l'affaiblissement dû à la pluie pour des longueurs de trajet de 20 à 69 km et pour des fréquences de 7 à 39 GHz ont été établies en République fédérale d'Allemagne pendant plus de deux ans [Abel, 1976; Valentin, 1977].

Aux fréquences supérieures à 50 GHz, les études sont moins nombreuses. Des calculs basés sur des travaux effectués aux Etats-Unis d'Amérique [Weibel et Dressel, 1967] montrent qu'au Royaume-Uni [Lane, 1968], à la fréquence de 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 un émetteur d'une puissance de 5 W, en supposant que les caractéristiques du récepteur sont les mêmes. De même, des mesures effectuées pendant 1 an à la fréquence de 110 GHz sur une distance de 2,6 km [Llewellyn-Jones et Zavody, 1972] montrent que l'utilisation de telles fréquences est possible pour établir des faisceaux hertziens de courte longueur, avec une fiabilité acceptable.

Les évanouissements dus aux nuages, au brouillard, à la neige et à la grêle sont généralement moins importants que ceux dus à la pluie (voir le Rapport 721). Cependant, l'affaiblissement dû à la neige mouillée peut être notable, de profonds évanouissements ayant été observés [CCIR, 1974-78d; Mogensen, 1977], mais la neige recouvrant l'antenne peut être un facteur aggravant.

### 6.3 *Durée et vitesse d'évanouissement*

Des mesures effectuées en France pendant une année à 13 GHz sur un trajet de 53 km ont montré que la distribution cumulative des durées d'évanouissement peut être représentée par une loi log-normale [Rooryck, 1973] et que la vitesse d'un évanouissement dû à la pluie est beaucoup moindre que la vitesse d'un évanouissement dû à des trajets multiples [Rooryck et Juy, 1977]. Des mesures effectuées au Danemark pendant 18 mois à 14 GHz sur un trajet de 45 km ont montré que la vitesse d'évanouissement n'excédait pas des valeurs d'environ 10 dB/s. La durée des évanouissements dus aux précipitations n'était pas en relation évidente avec le niveau du signal.

### 6.4 *Trajets en cascade et trajets convergents*

#### 6.4.1 *Généralités*

Les performances globales de systèmes en cascade dépendent des caractéristiques de propagation de chacune de leurs sections composantes. Il est néanmoins nécessaire de chercher à connaître les effets de la propagation sur les trajets en cascade, en plus des caractéristiques de propagation sur un seul bond. L'augmentation de la longueur d'un bond rend plus probable qu'il y ait une interruption de service, mais dans un système en cascade, comme il y a d'autant moins de bonds que chacun d'eux est plus long, cela permet d'assigner à chaque bond une plus grande probabilité d'arrêt.

#### 6.4.2 *Trajets en cascade*

Quand la longueur de bond est plus grande ou beaucoup plus grande que la taille d'une cellule de pluie et que la probabilité d'apparition de cellules de pluie est la même en tous les points de la zone considérée, la probabilité pour que l'affaiblissement dû à la pluie dépasse simultanément la portée dynamique du récepteur en plusieurs trajets adjacents, donc qu'il y ait interruption, est négligeable [Rue, 1977; Peroni et Fedi, 1974]. Il en résulte que la probabilité globale d'interruption de l'ensemble du circuit est égale à la somme des probabilités d'interruption de ses sections composantes.

Dans les climats très pluvieux et pour les bandes de fréquences les plus élevées, soit que la probabilité d'interruption admissible est très faible, soit que la marge d'affaiblissement disponible est relativement petite, la longueur de bond peut devenir égale ou inférieure à la taille de la cellule de pluie. L'affaiblissement dû à la pluie peut alors dépasser la portée dynamique du récepteur simultanément sur des trajets adjacents ou non. Une telle interruption dans des liaisons adjacentes ou non entraîne une réduction du temps global d'interruption du circuit, c'est-à-dire que la probabilité globale d'interruption du

circuit est moindre que la somme des probabilités d'interruption sur les liaisons composantes. Cette réduction a été étudiée au Japon [Sasaki et autres, 1976; Morita et Higuti, 1977]. On a trouvé que les probabilités d'interruption combinées pour des paires de trajets non adjacents sont négligeables par rapport aux probabilités d'interruption combinées pour des trajets adjacents (longueur moyenne de trajet: 4,5 km).

6.4.3 *Trajets convergents*

Lorsque deux trajets ou plus convergent vers une même station, le coefficient de corrélation d'affaiblissement entre des paires de trajets dépend de l'angle entre les trajets. Cette dépendance, ainsi que l'affaiblissement différentiel sur des trajets convergents et le brouillage entre trajets, ont été étudiés au Japon [Morita et Higuti, 1977] dans le cas où la longueur du trajet est plus petite que la cellule de pluie ou du même ordre de grandeur. A titre d'exemple, on a trouvé théoriquement que, pour un trajet de 4 km, le coefficient de corrélation croît de 0,8 à 0,9 quand l'angle que font les trajets entre eux décroît de 180° à 20°.

6.5 *Diversité de trajet*

Alors que les évanouissements dus à une propagation par trajets multiples peuvent être atténués par une séparation de quelques mètres des antennes, on doit choisir des trajets avec une séparation de quelques kilomètres pour réduire les évanouissements dus aux précipitations.

Des premiers résultats obtenus au Royaume-Uni [Harden et Turner, 1973; Hewitt et Norbury, 1973] indiquent qu'une séparation de 4 km améliore considérablement un système à commutation de trajets, mais que des séparations plus grandes n'apportent pas une amélioration proportionnellement plus grande.

## 7. Affaiblissement dû aux gaz

La propagation des ondes hyperfréquences à travers l'atmosphère est affaiblie par l'absorption due à l'oxygène et à la vapeur d'eau. Cet affaiblissement est habituellement négligeable aux fréquences inférieures à 10 GHz, mais peut devenir important aux fréquences plus élevées. L'affaiblissement dû à l'absorption gazeuse pour les fréquences supérieures à 10 GHz est examiné dans le Rapport 719.

## 8. Affaiblissement dû aux particules solides en suspension dans l'atmosphère

Le sable et les particules de poussière (par exemple, pendant des tempêtes violentes dans les zones désertiques) peuvent affaiblir ou diffuser un signal radioélectrique aux fréquences élevées. Cependant, des effets significatifs sur la propagation n'ont pas été rapportés jusqu'ici. On peut trouver des informations complémentaires sur l'affaiblissement par les particules solides dans le Rapport 720.

## 9. Réduction du découplage entre polarisations orthogonales due à la propagation

La possibilité d'augmenter la capacité d'un canal, en utilisant des ondes en polarisations orthogonales à la même fréquence sur le même trajet, est limitée par le phénomène de transpolarisation dû à la propagation. Les mécanismes qui sont responsables de tels changements de polarisation sont discutés en détail dans le Rapport 722. Dans cette section on ne considère que les résultats expérimentaux et les conclusions qui en ont été tirées, ainsi que les relations entre le découplage des polarisations croisées et l'affaiblissement d'ondes copolaires par la pluie.

9.1 *Effets des trajets multiples*

Le découplage des polarisations peut décroître sensiblement durant les évanouissements par trajets multiples. Cet effet peut être dû soit à l'influence combinée de la troposphère et des caractéristiques de l'antenne, soit uniquement à l'influence de la troposphère.

Des expériences effectuées en France à 6 et 7 GHz [Lefrançois et autres, 1973], à 13 GHz [Battesti et Constantinidis, 1975], au Japon à 6 GHz [Morita, 1971] et en République fédérale d'Allemagne à 7 GHz [CCIR, 1974-78e], sur des distances de 50 km ou plus, ont montré que le découplage entre des polarisations horizontale et verticale peut descendre au-dessous de 15 dB pendant 0,01% du temps, alors que le découplage dû aux antennes est supérieur à 40 dB dans des conditions normales de propagation.

Les distributions statistiques du découplage entre polarisations croisées, mesurées en France à 6, 7 et 13 GHz pour différentes valeurs de l'affaiblissement d'ondes copolaires, peuvent être représentées approximativement par une loi log-normale; des mesures effectuées à 7 GHz semblent montrer que le diagramme contrapolaire de l'antenne peut avoir une influence importante sur la distribution du découplage des polarisations [Rooryck et Martin, 1977].

9.2 *Effets des hydrométéores*

Comme il est noté dans le Rapport 722 le défaut de sphéricité des gouttes de pluie, combiné au parallélisme de leurs trajectoires durant leur chute, peut conduire à des changements dans l'état de la polarisation d'une onde qui se propage à travers la pluie.

Une expérience a été effectuée en Suisse en polarisation circulaire à 13 GHz, sur un trajet de 10 km incliné de 14°. Cette expérience a révélé une corrélation étroite entre l'affaiblissement des ondes copolaires et le découplage des polarisations croisées pendant de fortes précipitations. Des résultats analogues ont été obtenus en Italie à 11 GHz, sur un trajet de 8 km incliné de 9° [Tirro, 1975].

On a constaté également que, en polarisation circulaire, le découplage des polarisations croisées était inférieur de 10 à 15 dB par rapport au cas de la polarisation rectiligne verticale, pendant 0,01% du mois le plus défavorable [Possenti, 1975]. Des expériences effectuées au Japon à 3,6 et 6,3 GHz, sur un trajet de 43 km, ont confirmé que les effets de dépolarisation en présence de précipitations sont plus importants en polarisation circulaire qu'en polarisation horizontale ou verticale [Hosoya et Hashimoto, 1978].

Des études faites en France [Battesti et Constantinidis, 1975] à 13 GHz sur un trajet de 53 km ont montré que la pluie diminue peu le découplage entre les polarisations horizontale et verticale.

Des expériences faites au Japon en polarisations rectilignes, verticale et horizontale [Shimba et Morita, 1972; Yamamoto et autres, 1973], ainsi qu'aux Etats-Unis [Barnett, 1972b] dans la bande des 20 GHz sur des trajets compris entre 2,8 km et 5,0 km, ont montré que le découplage entre polarisations croisées diminue en cas de fortes précipitations. Les résultats indiquent que la relation moyenne entre les valeurs d'affaiblissement qu'on obtient avec la même polarisation et le découplage des polarisations croisées – valeurs d'affaiblissement dépassées pendant les mêmes pourcentages de temps – peut être représentée par l'expression empirique suivante:

$$D = -0{,}4\,A + 35{,}5 \qquad \text{dB} \tag{12}$$

où

$D$: découplage des polarisations croisées (dB),

$A$: affaiblissement supplémentaire d'ondes de même polarisation (dB),

avec $15 \leqslant A \leqslant 50$.

Cette formule, tirée de résultats expérimentaux, est valide seulement au voisinage de 20 GHz; on peut l'améliorer en tenant compte de la longueur et de l'inclinaison du trajet.

Une relation plus générale entre le découplage des polarisations et l'affaiblissement des ondes de même polarisation a été établie [Nowland et autres, 1977]. Pour les trajets en visibilité directe aux faibles angles de site et en polarisation horizontale ou verticale, cette relation peut s'écrire:

$$D = 12 + 30 \log f - 20 \log A \qquad \text{dB} \tag{13}$$

où

$f$: fréquence (GHz),

avec $8 \text{ GHz} \leqslant f \leqslant 20 \text{ GHz}$

et $15 \text{ dB} \leqslant D \leqslant 40 \text{ dB}$.

En polarisation circulaire, cette relation se réduit à:

$$D = 30 \log f - 20 \log A \qquad \text{dB} \tag{14}$$

Une relation similaire [Hosoya et Hashimoto, 1978] donne des résultats comparables et les deux relations sont en bon accord avec les résultats expérimentaux [Semplak, 1973; Dilworth et Evans, 1976].

## 10. Scintillation

Le phénomène de scintillation existe à toutes les fréquences, mais il est particulièrement manifeste au-dessus de 10 GHz. Des informations sont fournies à ce sujet dans le Rapport 718.

## 11. Effets des évanouissements dus à des trajets multiples sur la modulation

### 11.1 *Systèmes analogiques*

La propagation par trajets multiples contribue à la fois au bruit thermique et au bruit d'intermodulation qui prennent naissance dans un système à modulation de fréquence. Des mesures effectuées au Royaume-Uni sur une liaison de 55 km à 4 GHz avec 600 voies [Meadows et autres, 1966] et sur une autre de 58 km à 11 GHz avec 600 voies [Turner et autres, 1966] montrent que le bruit d'intermodulation causé par la propagation par trajets multiples n'est pas important en comparaison du bruit thermique.

Le même résultat a été obtenu en France sur une liaison de 95 km à 6 GHz avec 1800 voies et au Danemark sur 45 km à 14 GHz avec 2700 voies [Mogensen, 1977].

Cependant, des mesures effectuées en Allemagne sur deux liaisons de 138 km et 182 km à 6 GHz avec 1800 voies ont montré des augmentations importantes du bruit d'intermodulation ainsi que des variations considérables des niveaux de la bande de base pendant de faibles pourcentages du temps. Cela était dû à la propagation par trajets multiples, du fait de réflexions sur les couches de l'atmosphère [Fehlhaber, 1971, 1973 et 1976b].

Des mesures faites au Japon à 4 et 6 GHz [Nishino et autres, 1975], sur un long trajet maritime composé de sections d'environ 120 km, ont montré qu'il est possible de transmettre 960 voies téléphoniques satisfaisant aux Avis du CCIR sur les objectifs de bruit. Même sur une section entièrement maritime, dans laquelle il pouvait y avoir réflexion des ondes à la surface de la mer, le recours à la diversité d'espace a permis de réduire considérablement le bruit thermique et le bruit d'intermodulation.

Une autre expérience [Inoue et Akiyama, 1974], qui était menée sur un trajet maritime de 37,2 km à 4 GHz, avec une onde réfléchie sur la mer, a montré que la distribution cumulative de la durée des élévations du niveau de bruit (mesurée avec une constante de temps inférieure à une seconde) peut être représentée par une loi log-normale. Le bruit des circuits dans un récepteur simple présente des variations saisonnières très marquées; mais la réception en diversité d'espace, avec un espacement entre antennes égal à la moitié de la distance entre deux maximums d'interférence, aide grandement à réduire les bruits thermiques et d'intermodulation.

Des résultats semblables ont été obtenus en République fédérale d'Allemagne par réception en diversité avec commutation.

Des méthodes théoriques pour calculer les effets de la propagation par trajets multiples sur les systèmes analogiques ont été établies en Allemagne [Fehlhaber, 1971 et 1976b] et en France [Azoulay, 1975] pour confirmer ces effets. En Suède [Rue, 1971], une méthode a été mise au point pour calculer la distorsion quand plusieurs composantes de l'onde, même en grand nombre, sont présentes simultanément dans le signal reçu, avec des phases d'égale probabilité entre 0 et 2 $\pi$.

Des études théoriques et expérimentales effectuées au Japon [Nomura et autres, 1967] ont montré que les réflexions au sol peuvent donner une distribution du bruit global plus défavorable que celle afférente au seul bruit thermique, même pour des trajets de propagation comportant des réflexions relativement faibles sur le sol.

Sur les faisceaux hertziens (analogiques) MRF-MF, les variations de bruit thermique dues aux évanouissements par trajets multiples s'accumulent à l'extrémité du circuit. Cette caractéristique cumulative a été l'objet d'investigations au Japon, à la fois théoriquement et expérimentalement. Ces investigations ont mis en évidence la relation entre la distribution de la puissance du bruit thermique sur une seule section et sa distribution sur une liaison à plusieurs sections de longueur arbitraire [Morita et autres, 1971].

### 11.2 *Systèmes numériques*

Des mesures ont été faites en France sur des liaisons en modulation numérique quadrivalente à 6 GHz sur un trajet de 95 km et à 11,7 GHz sur un trajet de 58 km, respectivement à 40 et 200 Mbit/s. Pour le plus petit débit binaire, la profondeur des évanouissements dus aux trajets multiples peut être considérée comme pratiquement équivalente, en ce qui concerne le taux d'erreur, à un affaiblissement non sélectif de la même valeur. Pour le débit binaire le plus élevé, l'influence de la propagation par trajets multiples sur le taux d'erreur est beaucoup plus importante que celle d'un affaiblissement non sélectif de même valeur [Rooryck, 1977].

On a observé une baisse de qualité extrêmement importante dans une étude expérimentale portant sur des systèmes quadrivalents à 400 Mbit/s; ces essais ont été faits à 13,3 et 14,9 GHz sur un trajet de 22,8 km aux Etats-Unis [Dougherty et Hartman, 1977]. La quasi-totalité de cette baisse de qualité a été attribuée à une propagation par trajets multiples à deux composantes (terrain-atmosphère), qui causait des brouillages entre symboles. La conclusion de cette étude a été que la réception en diversité d'espace ou de fréquence aurait permis de remédier efficacement à ces défauts.

Quand des ondes en polarisations croisées sont utilisées à la même fréquence sur une liaison numérique, le brouillage dû à la transpolarisation limite la qualité de chaque canal radioélectrique. En France [Rooryck et Martin, 1977], la dégradation de la qualité sur une liaison MDPQ avec démodulation différentielle a été calculée en utilisant la distribution du découplage des polarisations, mesurée pendant des évanouissements par trajets multiples. Dans ce cas, la réception en diversité d'espace avec commutation donne à chaque canal une qualité meilleure que celle d'un canal fonctionnant avec une seule polarisation sans diversité [Martin, 1977].

## 12. Mesures des caractéristiques de propagation pour les faisceaux hertziens

Des mesures des caractéristiques de propagation sont parfois nécessaires pour identifier ou localiser les sources d'évanouissement. Quand on analyse les phénomènes d'évanouissement, il faut distinguer entre les évanouissements causés par les trajets multiples dus à la réflexion sur le sol, sur l'eau ou sur d'autres surfaces à la réflexion sur des discontinuités atmosphériques et à la diffraction sphérique par la Terre (sur un trajet à faible valeur de *k)* ou à une réfraction très importante. L'observateur peut faire la distinction entre ces phénomènes d'évanouissement par émission d'impulsions, ce qui permet de mesurer directement l'amplitude et le temps de propagation et de dégager ainsi les composantes du signal reçu [Lindfield et autres, 1976].

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABEL, N. [1976] Affaiblissement dû aux précipitations sur des liaisons radioélectriques de Terre fonctionnant entre 7 et 15 GHz. Estimations et mesures faites en République fédérale d'Allemagne (en allemand). Techn. Ber. FTZ, 455 TBr 57.

AZOULAY, A. [septembre-octobre 1975] Étude de l'influence de la propagation sur les fluctuations du niveau de la bande de base des faisceaux hertziens. *Ann. des télécomm.*, 31, 271-280.

BARNETT, W. T. [octobre 1970] Microwave line-of-sight propagation with and without frequency diversity. *BSTJ,* Vol. 49, 8.

BARNETT, W. T. [février 1972a] Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz, *BSTJ*, Vol. 51, 2.

BARNETT, W. T. [1972b] Some experimental results on 18 GHz propagation. IEEE National Telecommunication Conference, 10E-1-4.

BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [juillet-août 1964] Étude des sections longues dans les faisceaux hertziens en visibilité. *Ann. des télécomm.*

BATTESTI, J. et CONSTANTINIDIS, T. [1975] Étude du découplage de polarisation sur une liaison de 53 km à 13 GHz; généralisation des résultats obtenus. Note technique CNET-EST/APH/28.

BELL, J. [1967] Propagation measurements at 3, 6 and 11 GHz over a line-of-sight radio path. *Proc. IEE*, **114**, 5, 545.

BLEVIS, B. C., DOHOO, R. M. et McCORMICK, K. S. [1967] Measurements of rainfall attenuation at 8 and 15 GHz. *IEEE Trans.*, AP-15, 394-403.

BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1967] Protection against fading on line-of-sight radio-relay systems (en français). *Ann. des télécomm.*

BULLINGTON, K. [juillet-août, 1971] Phase and amplitude variations in multipath fading of microwave signals. *BSTJ*, Vol. 50, 6.

CRAWFORD, A. B. et JAKES, W. C. [1952] Selective fading of microwaves. *BSTJ*, 68-90.

DILWORTH, I. J. et EVANS, B. G. [novembre, 1976] Preliminary results of linear/circular depolarization on a 18 km, 11.6 GHz radio link. *Electronic Letters*, 12, **23**, 618-620.

DOUGHERTY, H. T. et HARTMAN, W. J. [avril 1977] Performance of a 400 Mb/s system over a line-of-sight path. *IEEE Trans.* COM-25, **4**.

FEDI, F., MERLO, U. et MIGLIORINI, P. [1977] Effect of the rain rate profile along a path on rain induced attenuation. Colloque ouvert sur la propagation en milieu non ionisé. Proceedings of URSI Symposium, La Baule (France).

FEDI, F., MERLO, U. et MIGLIORINI, P. [1978] Effect of rain structure on rain induced attenuation. A paraître in *Ann. des télécomm.*

FEHLHABER, L. [février 1971] Intermodulation noise in FM-FDM radio-relay systems on line-of-sight paths as a result of phase interference fading (en allemand). Tech. Ber. FTZ, A 455 TBr 29.

FEHLHABER, L. [février 1973] Breitband-Ausbreitungsmessungen auf einem 138 km langen Funkfeld bei 6 GHz (Mesures de propagation à large bande sur un trajet de 138 km à 6 GHz). Tech. Ber. FTZ, A 455 TBr 40.

FEHLHABER, L. [1976a] Influence du tracé du trajet sur les évanouissements sur des faisceaux hertziens à visibilité directe (en allemand). Tech. Ber. FTZ, 455 TBr 59.

FEHLHABER, L. [1976b] Distribution de la probabilité des brouillages causés à des faisceaux hertziens par des phénomènes de propagation (en allemand). Tech. Ber. FTZ, A 455 TBr 60.

FIMBEL, J., JUY, M. et BOITHIAS, L. [1976] Importants affaiblissements dus à la pluie mesurés sur une liaison de 53 km à 13 GHz. *Electronics Letters*, Vol. 12, **5**, 119-120.

GIUGLIARELLI, G. [avril 1965] Influence de la propagation maritime sur la transmission des signaux de télévision en couleurs. *Revue technique de l'UER*, 90A.

HARDEN, B. N. et TURNER, D. [1973] Propagation studies and the development of terrestrial microwave radio-relay systems above 10 GHz in the United Kingdom. IEE Conference on propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz. *IEE Conf. Publ.*, **98**, 1-5.

HEWITT, M. T. et NORBURY, J. R. [1973] Correlation of fading on spaced microwave paths at 22 and 37 GHz. IEE Conference on propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz. *IEE Conf. Publ.*, **98**, 250-255.

HICKIN, E. M. [septembre-octobre 1968] 18 GHz Propagation. IEE Conference on Tropospheric Wave Propagation, Londres.

HOSOYA, Y. et HASHIMOTO, A. [1978] Rain induced depolarization of circularly polarized waves. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Vol. 26. (à paraître).

IKEGAMI, F., AKIYAMA, T., AOYAGI, S. et YOSHIDA, H. [mars 1968] Variation of radio refraction in the lower atmosphere. *IEEE Trans.*, Vol. AP-16, 3.

INOUE, T. et AKIYAMA, T. [1974] Propagation characteristics on a line-of-sight oversea paths in Japan. *IEEE Trans.*, AP-22, **4**, 557-565.

LANE, J. A. [1968] Scintillation and absorption fading on line-of-sight links at 35 and 100 GHz. *IEE Conf. Publ.*, **48**, Tropospheric wave propagation, IEE, Londres, 166.

LEFRANÇOIS, G., MARTIN, L. et ROORYCK, M. [juillet-août 1973] Influence de la propagation sur la valeur de découplage de deux polarisations orthogonales. *Ann. des télécomm.*

LEWIN, L. [1962] Diversity reception and automatic phase correction. *Proc. IEE*, 109B, 295-304.

LIN, S. H. [décembre 1971] Statistical behaviour of a fading signal. *BSTJ*, Vol. 50, **10**.

LINDFIELD, R. F., HUBBARD, R. W. et PRATT, L. E. [1976] Transmission channel characterization by impulse response measurements. OT Report, PB258577, NTIS, Springfield, Va, USA.

LLEWELLYN-JONES, D. T. et ZAVODY, A. M. [1972] Microwave attenuation due to rain at 110 GHz in South-East England. *Electronic Letters*, **8**, 97.

McGAVIN, R. E., DOUGHERTY, H. T. et EMMANUEL, C. B. [juin 1970] Microwave space and frequency diversity performance under adverse conditions, *IEEE Trans.* COM-18, **18**.

MARTIN [décembre 1977] La Réutilisation de fréquence en polarisations croisées sur une liaison de 50 km à 7 GHz. *Ann. des télécomm.*

MEADOWS, R. W. et autres [1966] Measurement of multipath propagation over a line-of-sight radio link at 4 GHz using frequency-sweep technique. *Proc. IEE*, **113**, 1, 41.

MOGENSEN, G. [avril 1977] Experimental investigations of radio wave propagation in the 13.5-15.0 GHz frequency band. Publication No. LD 30, Electromagnetics Institute, Technical University of Denmark.

MORITA, K. [novembre-décembre 1970] Prediction of Rayleigh fading occurrence probability of line-of-sight microwave links. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 18, 11-12.

MORITA, K. [mai-juin 1971] Fluctuation of cross polarization discrimination ratio due to fading. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 19, 5-6.

MORITA, K. [juillet-août 1972] Prediction of equivalent Rayleigh fading occurrence rate on line-of-sight reflected wave path. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT*, Japon, Vol. 20.

MORITA, K., HIGUTI, I. et KASHIMURA, K. [1971] Study of accumulation of thermal noise power due to fading in microwave relay links. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT.*, **19**, 1-2, 137-157.

MORITA, K. et HIGUTI, I. [1977] Theoretical studies on simultaneous probability of rain attenuation in microwave and millimeter wave multi radio-relay links. *Rev. Elect. Comm. Lab. NTT.*, **25**, 3-4, 329-335.

NBS [1967] National Bureau of Standards. Technical Note No. 101, revisée, I et II, AD 687820 et AD 687821, National Technical Information Service, Springfield, Va (USA).

NISHINO, K., YAMADA, Y. et HASHIMOTO, A. [1975] Propagation characteristics of microwave on a long-distance oversea span. *Japan Telecomm. Rev.* 17, **2**.

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

NORTON, K. A., HUFFORD, G. A., DOUGHERTY, H. T. et WILKERSON, R. E. [1965] Diversity design for within-the-horizon radio-relay systems. COM-73-10103, NTIS, Springfield, Va, (USA).

NOWLAND, W. L., OLSEN, R. L. et SHKAROFSKY, I. P. [1977] Theoretical relationship between rain depolarization and attenuation. *Electronics Letters*, Vol. 13, **22**, p. 676-678.

PERONI, B. et FEDI, F. [1974] The calculation of the hop length of digital radio-relay systems at frequencies above 10 GHz. *Alta Frequenza*, Vol. XLII, **9**.

POSSENTI, G. [avril 1975] Attenuation and depolarization measurements on an inclined path at 11 GHz. Symposium on problems of space and terrestrial microwave propagation, Graz.

ROORYCK, M. [1973] Étude de la propagation à 13 GHz sur un trajet de 53 km. Note technique EST/APH/21.

ROORYCK, M. [décembre 1977] Dégradation de la qualité due aux trajets multiples dans un système à transmission numérique aux 4 états de phase. *Ann. des télécomm.*

ROORYCK, M. et JUY, M. [1977] Résultats de 5 ans de mesures à 13 GHz sur un trajet de 53 km. Note technique TCR/APH/43.

ROORYCK, M. et MARTIN, L. [décembre 1977] Disponibilité des liaisons hertziennes numériques utilisant des polarisations croisées à la même fréquence. *Ann. des télécomm.*

RUE, O. [décembre 1971] Intermodulation distortion owing to multipath propagation over FM/FDM microwave links. *Proc. IEE*, Vol. 118, **12**.

RUE, O. [1977] Effects of rainstorms on the system performance of multihop radio-relay links. Proceedings URSI Comm., La Baule (France).

SASAKI, O., MORITA, K. et KIJUSHIMA, M. [1976] 19 GHz rain attenuation characteristics on four tandem links. *IEEE Trans.*, AP-24, 2, 216-220.

SEMPLAK, R. A. [juillet-août 1973] The effect of rain on circular polarization at 18 GHz. *BSTJ.* **52**, 6, 1029-1031.

SHIMBA, M. et MORITA, K. [1972] Radio propagation characteristics due to rainfall at 19 GHz. International IEEE/G-AP Symposium, 246-249.

TIRRO, S. [1975] The Magnola 11.6 GHz depolarization experiment. Symposium on Satellite Communication System Technology, IEE, Londres.

TURNER, D. et autres [1966] Experimental investigation into radio propagation at 11.0-11.5 GHz. *Proc. IEE*, **113**, 9, 1477.

VALENTIN, R. [1977] Données statistiques sur l'affaiblissement dû à la pluie pour des faisceaux hertziens fonctionnant au-dessus de 10 GHz (en allemand). Tech. Ber. FTZ, 455 TBr. 62.

VIGANTS, A. [mars 1971] Number and duration of fades at 6 and 4 GHz, *BSTJ*, Vol. 50, 3.

VIGANTS, A. [janvier 1975] Space-diversity engineering. *BSTJ*, Vol. 54, **1**.

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

YAMAMOTO, H., MORITA, K. et NAKAMURA, Y. [1973] Experimental considerations on 20 GHz high-speed digital radio-relay systems. IEEE International Conf. on Communications, 28-37-42.

*Documents du CCIR*

[1974-78]: **a.** 5/242 (Italie); **b.** 5/216 (France); **c.** 5/219 (France); **d.** 5/165 (Royaume-Uni); **e.** 5/57 (République fédérale d'Allemagne).

AVIS 530 *

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON (DIFFUSION TROPOSPHÉRIQUE)

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que, pour la planification adéquate des faisceaux hertziens transhorizon utilisant la diffusion troposphérique, il est nécessaire d'avoir des données sur la propagation qui soient fondées, du point de vue de la fiabilité, sur les facteurs d'influence du terrain et du climat,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

que les méthodes de calcul énoncées dans le Rapport 238-3 soient utilisées pour la planification des systèmes utilisant la diffusion troposphérique.

---

RAPPORT 238-3 **

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON ***

(Programme d'études 5B-1/5)

(1959 - 1963 - 1970 - 1974 -1978)

### 1. Introduction

Il est bien connu que, dans les conditions habituelles de la réfraction, l'affaiblissement de transmission sur les fréquences situées au-dessus de 30 MHz augmente brusquement au-delà de l'horizon, conformément à la diffraction autour d'une terre sphérique, mais une fois qu'il a augmenté de quelques dizaines de décibels au-dessus de la valeur en espace libre, le taux d'affaiblissement en fonction de la distance (ou affaiblissement linéique) 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. Toutefois, les signaux persistants sont attribués à la diffusion des ondes radioélectriques par des non-homogénéités du coïndice imputables à la turbulence atmosphérique. Ce mode de propagation est appelé «diffusion troposphérique».

On observe des variations lentes et rapides du champ. Les variations lentes sont imputables aux variations générales des conditions de réfraction dans l'atmosphère. Les valeurs médianes horaires au-dessous de la valeur médiane à long terme présentent une répartition approximativement log-normale, avec un écart type compris généralement entre 4 et 8 décibels suivant le climat. Les variations les plus importantes de l'affaiblissement de transmission sont souvent observées sur des trajets où le récepteur est situé juste au-delà de la région de diffraction, alors qu'aux très grandes distances les variations sont moins prononcées. Les évanouissements lents ne dépendent pas fortement de la fréquence radioélectrique. Les évanouissements rapides se produisent plusieurs fois par minute aux fréquences basses et plusieurs fois par seconde dans les bandes d'ondes décimétriques. La superposition de plusieurs composantes incohérentes variables donnerait un signal dont l'amplitude obéirait à une

---

* Cet Avis doit être porté à l'attention de la Commission d'études 9.

** L'attention de la Commission d'études 9 doit être attirée sur le présent Rapport.

*** Ce Rapport peut aussi être utilisé pour les calculs de propagation dans les problèmes de brouillages, aux fréquences inférieures à 0,6 GHz. Aux fréquences supérieures, on utilise le Rapport 569-1.

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.

Pour les trajets radioélectriques ne s'étendant que légèrement au-delà de l'horizon, ou pour les trajets passant au-dessus d'un obstacle ou au-dessus d'un terrain montagneux, c'est généralement la diffraction qui constitue le mode de propagation déterminant pour l'intensité de champ. En pareils cas, il convient d'appliquer les méthodes décrites dans l'Avis 526.

## 2. Méthode générale pour le calcul de la valeur médiane annuelle de l'affaiblissement de transmission sur les trajets à diffusion troposphérique

On a la formule approchée ci-après pour le calcul de la valeur médiane annuelle de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion troposphérique:

$$L(50) = 30 \log f - 20 \log d + F(\theta d) - G_p - V(d_e) \quad \text{dB} \qquad (1)$$

où $f$ est la fréquence en mégahertz. La Fig. 1 représente les variations de $F(\theta d)$ en fonction du produit $\theta d$. La distance angulaire $\theta$ (radian) est l'angle formé par les rayons à l'horizon radioélectrique, dans le plan du grand cercle qui contient les antennes pour des conditions atmosphériques médianes et $d$ (km) est la distance entre les antennes [NBS, 1967].

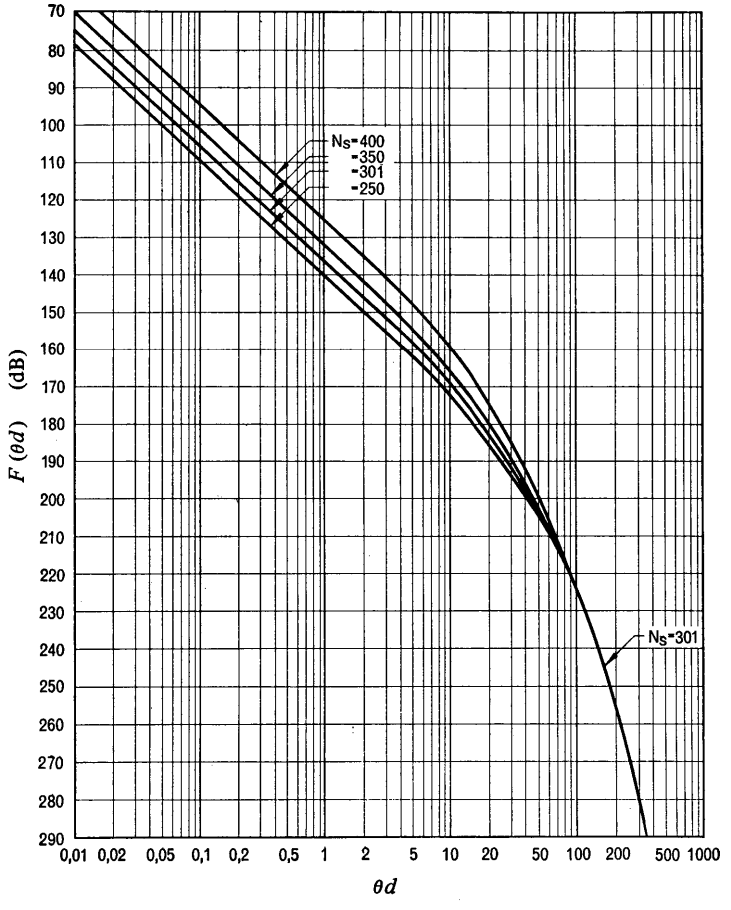



FIGURE 1 – *Fonction d'affaiblissement, $F(\theta d)$; d en km et $\theta$ en radian*

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

$$G_p = G_t + G_r - 0{,}07 \exp [0{,}055 (G_t + G_r)] \quad \text{dB} \qquad (2)$$

pour des valeurs de $G_t$ et $G_r$ inférieures chacune à 50 dB (voir aussi le § 9).

$V(d_e)$ est un facteur de correction qui tient compte des divers types de climat (voir le § 3). On définit comme suit une «distance équivalente» $d_e$ en fonction de la longueur du trajet de propagation $d$, des hauteurs équivalentes d'antenne $h_{te}$ et $h_{re}$ (m) au-dessus du terrain et de la fréquence $f$ en MHz.

On définit $\theta_{sl}$ 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 équivalent $a$ = 9000 kilomètres et l'on définit $d_{sl}$ comme égal à 9000 $\theta_{sl}$. Ainsi:

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

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

$$d_L = 3\sqrt{2h_{te}} + 3\sqrt{2h_{re}} \quad \text{km} \tag{4}$$

où les hauteurs équivalents 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 de l'affaiblissement de transmission (voir aussi § 4) 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:

$$\text{pour } d \leqslant d_L + d_{sl}, \quad d_e = 130\, d/(d_L + d_{sl}) \quad \text{km} \tag{5a}$$

$$\text{pour } d > d_L + d_{sl}, \quad d_e = 130 + d - (d_L + d_{sl}) \quad \text{km} \tag{5b}$$

En ce qui concerne la médiane annuelle de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion troposphérique, la République Populaire de Chine a obtenu la formule semi-empirique suivante, un peu différente de la formule (1):

$$L(50) = 124{,}6 + 30 \log f + 30 \log \theta + 10 \log d + f(H) - 0{,}08\,(N_s - 323) - G_p \quad \text{dB} \tag{1a}$$

où

$$f(H) = 20 \log (5 + 0{,}3\,H) + 0{,}65\,H \quad \text{dB}$$

$$H = \frac{S\theta d}{4}$$

$$S = \frac{4S_1}{(1 + S_1)^2} \qquad S_1 = \frac{d_1}{d_2}$$

$d_1$ et $d_2$ étant les distances, dans le plan du grand cercle, du point où se coupent les rayons dirigés vers l'horizon radioélectrique respectivement aux points d'émission et de réception et $N_s$ la valeur moyenne annuelle du coïndice de réfraction au sol.

### 3. Influence du climat

On définit les types de climat ci-après, dont il faut tenir compte pour la correction des données de propagation indiquées aux § 2, 4 et 5. Ces corrections sont confirmées par des résultats de mesure.

Type 1: Climat équatorial (données du Congo et de la Côte d'Ivoire).

Type 2: Climat intertropical continental (Soudan).

Type 3: Climat intertropical maritime (données de la Côte occidentale d'Afrique).

Type 4: Climat désertique (Sahara).

Type 5: Climat méditerranéen (pas de courbes disponibles).

Type 6: Climat continental tempéré (données fournies par la France, la République fédérale d'Allemagne et les Etats-Unis d'Amérique).

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

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

Type 8: Climat polaire (pas de courbes disponibles).

Cette division est évidemment assez grossière et les conditions géographiques locales pourraient nécessiter d'importantes modifications.

Les valeurs de $V(d_e)$ (voir le § 2) sont données dans la Fig. 2, en fonction de la distance pour les différents climats.

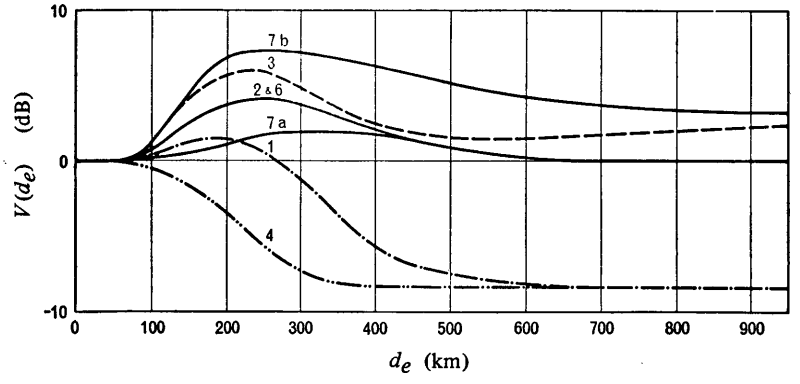



FIGURE 2 – *Fonction $V(d_e)$ pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir § 3)*

Dans les climats tempérés, les 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. sur un trajet de 920 km montrent que la différence entre les médianes obtenues en été et en hiver n'est que de 2 dB. Pour des trajets de longueur moyenne, la différence est d'environ 15 dB. Il y

a également des variations diurnes, l'affaiblissement de transmission étant généralement maximal dans l'après-midi. Les trajets maritimes ont plus de chances que les trajets terrestres d'être affectés par la superréfraction et les couches élevées; on a donc des variations plus importantes sur les trajets maritimes. Il en est parfois de même dans les régions côtières à terrain plat et bas, dans les zones maritimes.

Dans les climats désertiques secs et chauds, l'affaiblissement est maximal en été. Les variations annuelles des médianes mensuelles pour des trajets de longueur moyenne dépassent 20 dB. Les variations diurnes sont très importantes.

Dans les climats équatoriaux, les variations annuelles ou diurnes sont en général faibles.

Dans les climats de mousson, où des mesures ont été faites (Sénégal, Barbades), l'affaiblissement est minimal pendant les périodes de transition entre les saisons sèches et les saisons humides.

## 4. Variations à long terme de la médiane horaire de l'affaiblissement de transmission dans différents climats

La qualité du fonctionnement d'un service de radiocommunication dépend du rapport signal/bruit. En règle générale, si l'on veut obtenir un service satisfaisant sur un trajet de propagation donné, il faut assurer une protection contre les bruits lorsque les conditions de propagation sont médiocres. * La valeur minimale admissible du rapport dépend, d'une part, des caractéristiques des évanouissements subis par le signal et par les bruits, d'autre part, des systèmes de démodulation et de codage utilisés. Le rapport signal/bruit dépend de l'intensité des signaux utiles et des bruits, et varie avec le temps. On fait une distinction entre les évanouissements rapides (voir les § 1 et 10) et les variations journalières et saisonnières lentes ou «évanouissements de puissance à long terme», qui sont liées à des variations des conditions moyennes de réfraction, de turbulence ou de stratification de l'atmosphère.

Il est commode de décomposer la puissance d'enveloppe instantanée (dBW) en deux composantes additives, l'une correspondant aux évanouissements rapides, l'autre aux évanouissements de puissance à long terme. Dans ce paragraphe, on ne considérera que les médianes horaires des affaiblissements de transmission à long terme ainsi que les variations temporelles de ces valeurs au cours d'une année.

On peut faire une estimation de $P(q)$, valeur de la puissance $P$ dépassée pendant $q$ % du temps, ou de $L(q)$, valeur de $L$ dépassée pendant un pourcentage du temps de $(100 - q)$. La grandeur $P(q)$ et l'affaiblissement de transmission correspondant $L(q)$ sont exprimés en fonction des médianes à long terme $P(50)$ et $L(50)$:

Ainsi:

$$P(q) = P(50) + Y(q) \qquad \text{dBW} \qquad (6a)$$

ou bien:

$$L(q) = L(50) - Y(q) \qquad \text{dB} \qquad (6b)$$

$$Y(q) = Y_0(q)\, g(f) \qquad (7)$$

La Fig. 3 illustre des estimations empiriques du facteur $g(f)$ et les Fig. 4 à 10 des estimations empiriques de $Y_0(q)$ pour les divers climats.

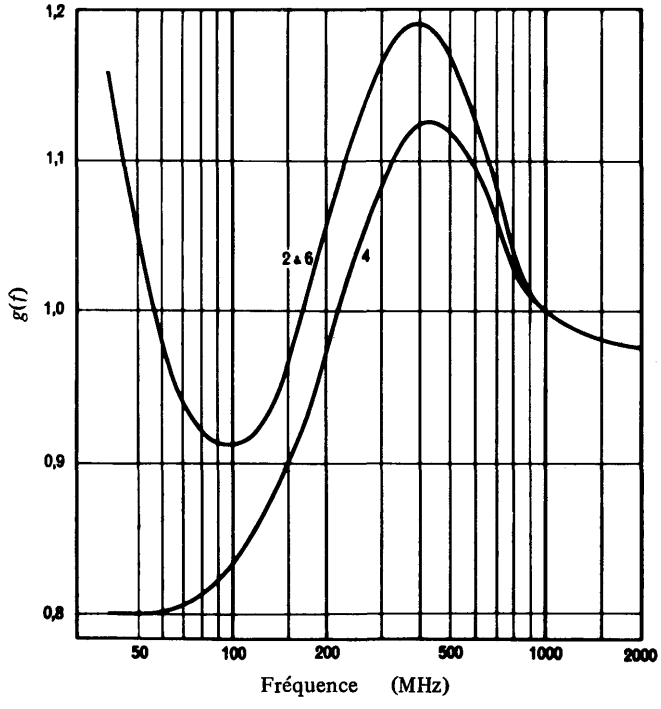



FIGURE 3 – *Fonction g(f) pour les types de climat désignés par des chiffres sur les courbes (voir § 4)*

* En revanche, il faut assurer une protection contre les signaux brouilleurs transmis dans la même voie ou dans une voie adjacente, lorsque les conditions de propagation sont défavorables (voir le Rapport 569-1).

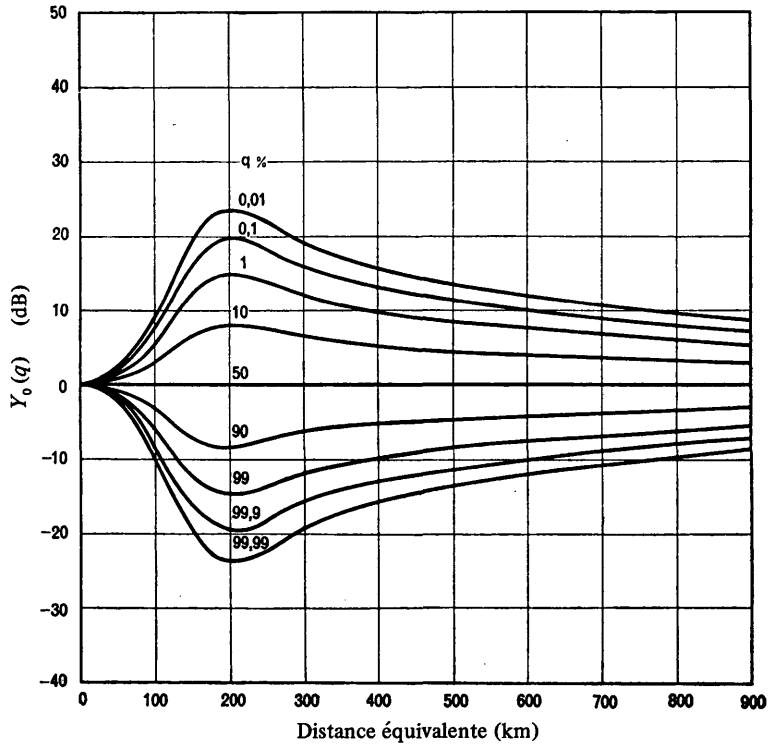



FIGURE 4 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 1 (équatorial)*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes)

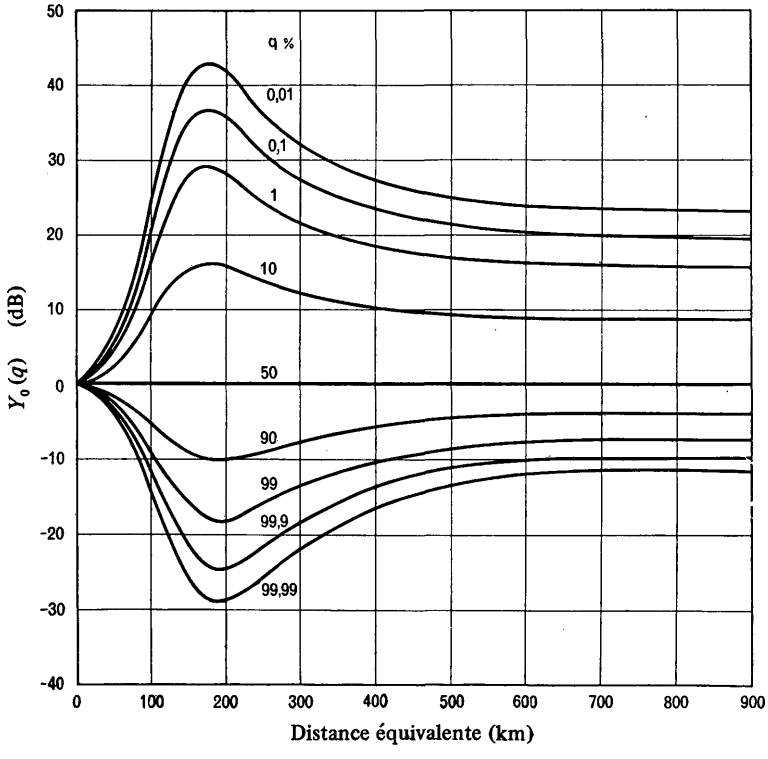



FIGURE 5 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 2 (intertropical continental, Soudan)*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes)

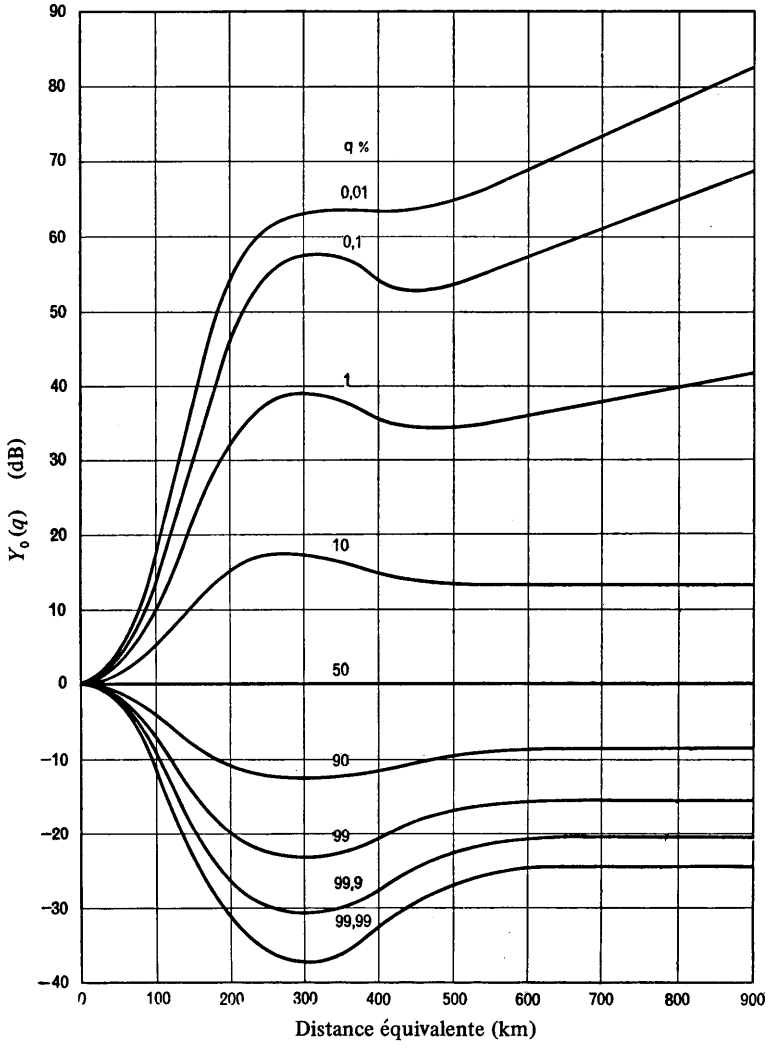



FIGURE 6 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 3 (intertropical maritime)*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes)

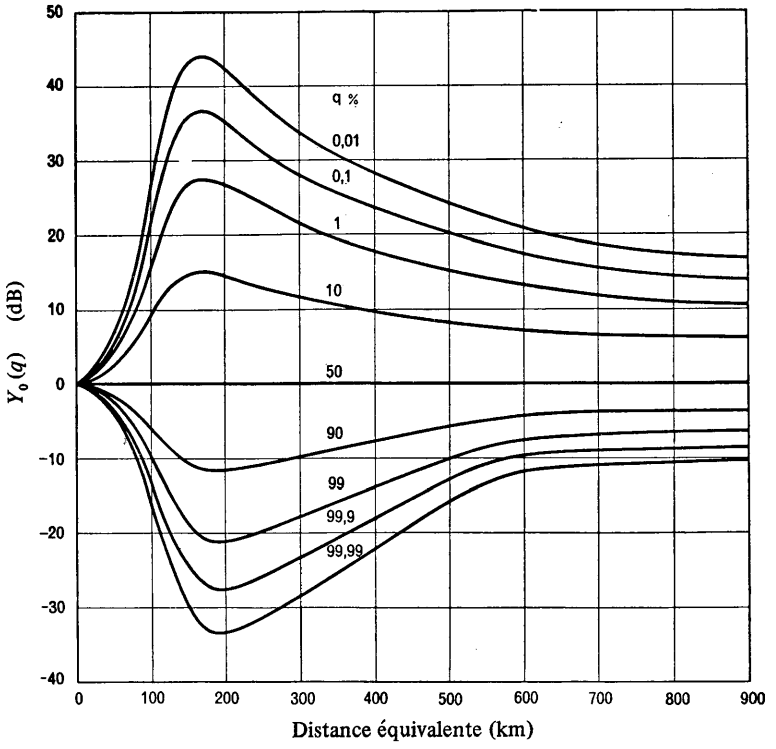



FIGURE 7 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 4 (désertique, Sahara)*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes )

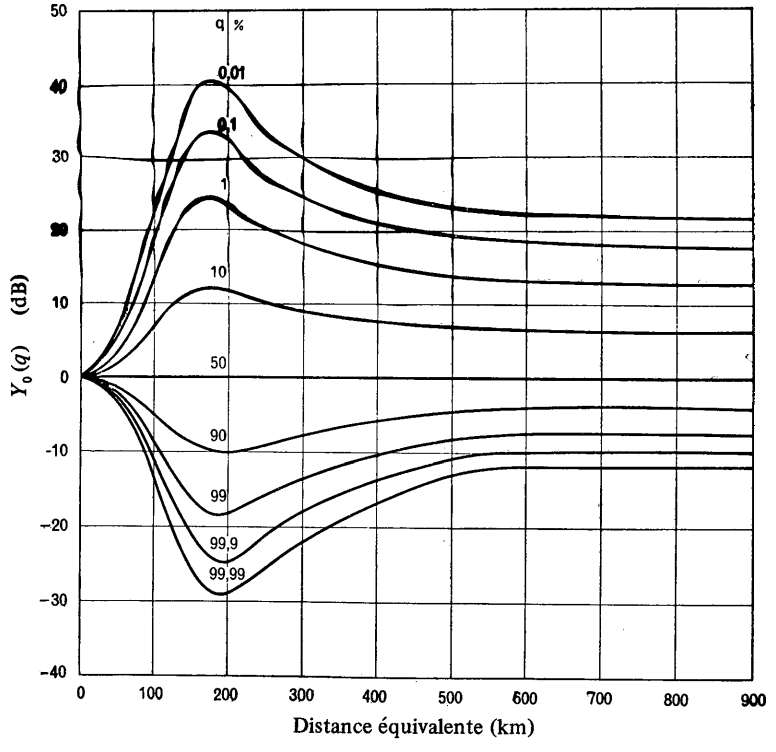



FIGURE 8 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 6 (continental tempéré)*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes )

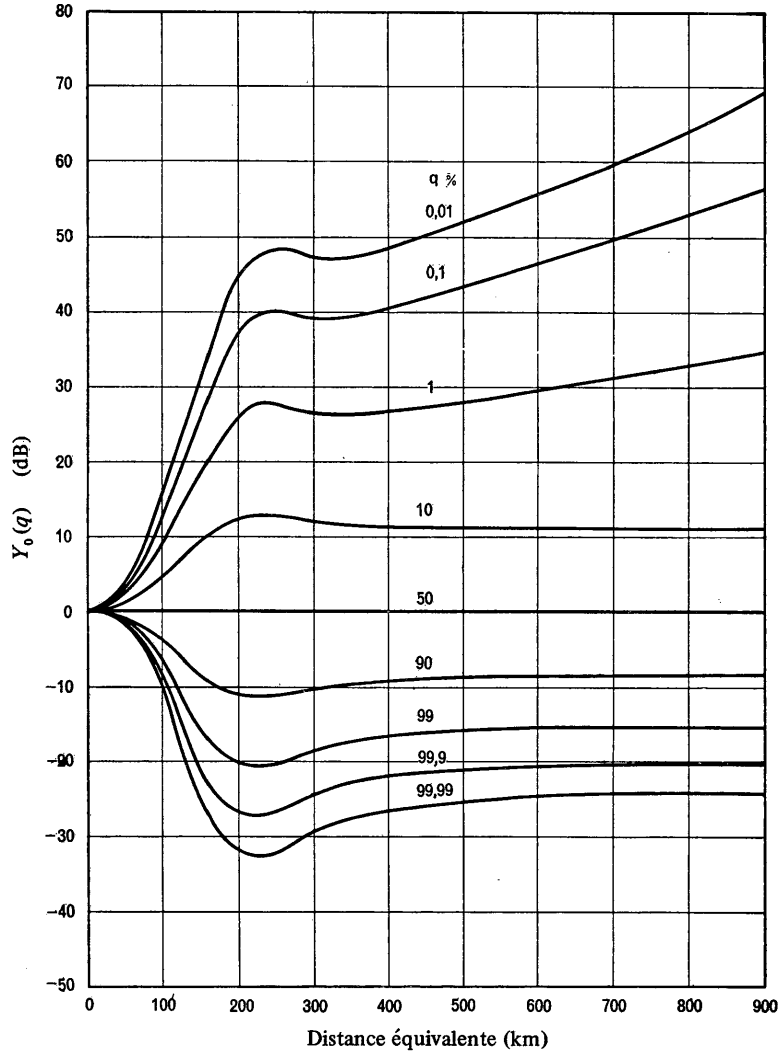



FIGURE 9 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 7a (maritime tempéré). Trajets terrestres*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes)

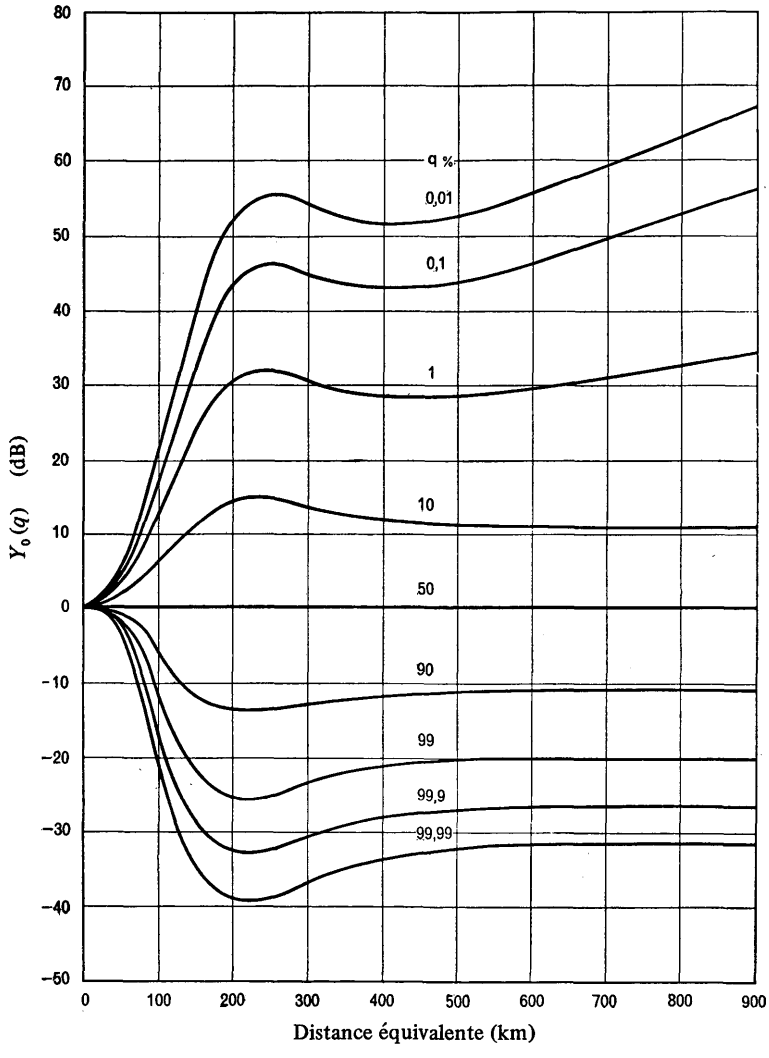



FIGURE 10 – *Variation de l'affaiblissement de transmission pour le climat du type 7b (maritime tempéré). Trajets maritimes*

(Les valeurs de $q$ sont indiquées sur les courbes)

La formule ci-après donne une estimation de l'erreur type commise dans la prévision, pour un pourcentage du temps quelconque:

$$\sigma(q) = \sqrt{13 + 0{,}12\ Y^2(q)} \qquad \text{dB} \qquad (8)$$

Dans la République Populaire de Chine, l'analyse des mesures montre que la variation à long terme (annuelle) des médianes horaires des affaiblissements de transmission a une distribution log-normale et que son écart type peut se calculer comme suit:

$$\delta \begin{cases} = 7 + 0{,}09\ \Delta N_s e^{-0{,}003\ d_s} & \text{dB} \quad \text{(en plaine)} \\ = 4{,}6 + 0{,}06\ \Delta N_s e^{-0{,}003\ d_s} & \text{dB} \quad \text{(en région montagneuse)} \\ = 8{,}8 + 0{,}11\ \Delta N_s e^{-0{,}003\ d_s} & \text{dB} \quad \text{(en mer)} \end{cases}$$

où $\Delta N_s$ est la différence entre les moyennes du coïndice au sol $N_s$ en hiver et en été, $d_s$ (km) est la différence entre la longueur du trajet et la somme des distances du point d'émission et du point de réception à leurs horizons radioélectriques respectifs, dans le plan du grand cercle.

## 5. Affaiblissement de transmission non dépassé pendant 99% du temps dans le mois le plus défavorable

Dans une autre méthode, décrite en [Boithias et Battesti, 1965], on détermine l'affaiblissement qui n'est pas dépassé pendant un grand pourcentage de temps, par exemple, 99% du temps dans le mois le plus défavorable. On a généralement besoin de ce genre de renseignement pour étudier les liaisons de point à point.

Après avoir déterminé la distance équivalente (ici définie comme le produit de la distance angulaire, $\theta$, par le rayon équivalent de la Terre) par une étude du profil de la liaison tracé pour une terre de rayon 8500 km, on se reporte aux courbes de la Fig. 11 établies pour une fréquence de 1 GHz pour les différents climats définis en annexe. On obtient ainsi pour le climat considéré l'affaiblissement entre antennes isotropes. Les climats considérés ici sont les mêmes que ceux mentionnés au § 3.

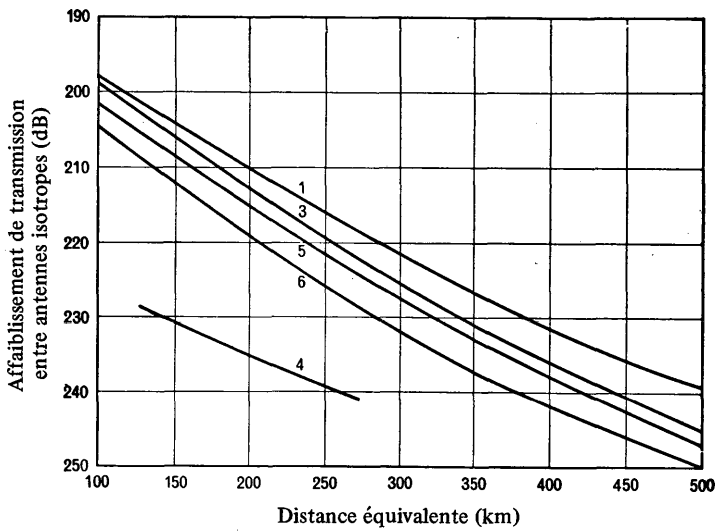



FIGURE 11 – *Valeur de l'affaiblissement de transmission qui n'est pas dépassée pendant 99% du mois le plus défavorable pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 3)*

Pour une fréquence quelconque comprise entre environ 200 et 4000 MHz, on ajoute à l'affaiblissement précédent la correction lue sur la Fig. 12. On obtient ainsi pour la fréquence et le climat choisis les affaiblissements non dépassés pendant 99% du temps dans le mois le plus défavorable.

S'il est nécessaire de connaître l'affaiblissement pour un autre pourcentage du mois le plus défavorable, on détermine l'écart type par la Fig. 13 et on admet une loi log-normale pour représenter la distribution mensuelle des variations lentes.

D'autres méthodes sont décrites dans [Wvedensky, 1965].

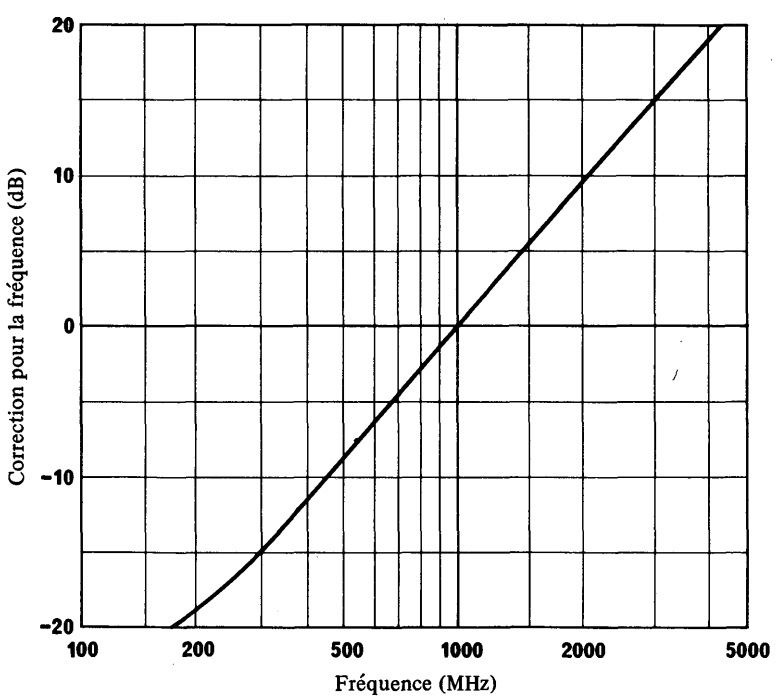



FIGURE 12 – *Corrections à appliquer aux valeurs obtenues à partir des courbes de la Fig. 11 pour des fréquences autres que 1 GHz*

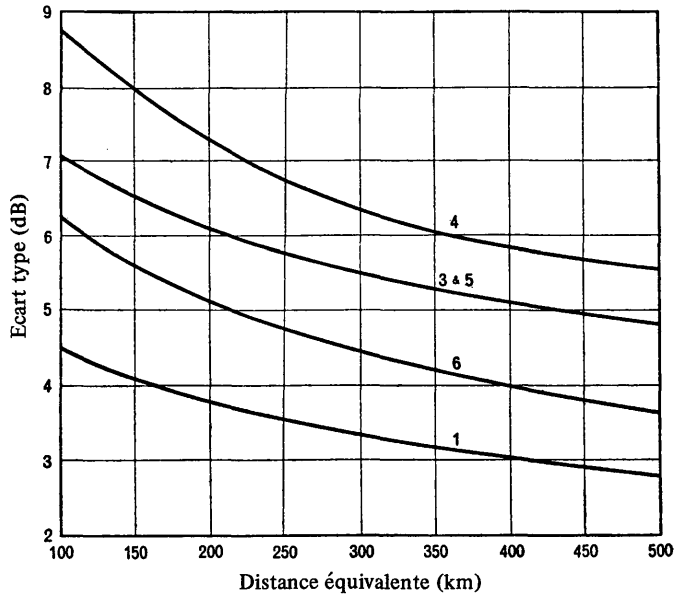



FIGURE 13 – *Ecart type pour les types de climat indiqués sur les courbes (voir le § 3)*

## 6. Calcul de l'affaiblissement de transmission lorsqu'on connaît les paramètres radiométéorologiques

Des études effectuées par l'Administration française ont montré que l'affaiblissement entre antennes isotropes pouvait être représenté par une formule qui semble être valable dans tous les climats:

$$L_b = 110{,}5 + 30 \log d + 30 \log f - T \qquad (9)$$

$L_b$: affaiblissement entre antennes isotropes (affaiblissement de transmission de référence) (dB);

$d$: distance (km);

$f$: fréquence (MHz);

$T$: paramètre déterminé à l'aide de sondages météorologiques (voir le Rapport 718).

Le pourcentage du temps auquel correspond la valeur de $L_b$ dépend des heures d'exécution des sondages météorologiques utilisés, comme cela est expliqué dans [Battesti et autres, 1968].

On a constaté une bonne concordance entre la formule (9) et les données mesurées. On pourrait encore améliorer la méthode de calcul par les modifications suivantes:

– remplacer le terme 30 log $d$ de la formule (9) par l'expression:

$$20 \log d + 10 \log D_s$$

où $D_s$ est la distance en kilomètres entre les horizons radioélectriques dans des conditions atmosphériques médianes;

– remplacer la constante 110,5 dB par l'expression

$$K_1(D_s) - K_2(D_s\theta)$$

ou $\theta$ est la distance angulaire, en radians, dans des conditions atmosphériques médianes. Les fonctions $K_1(D_s)$ et $K_2(D_s\theta)$ sont représentées aux Fig. 14a et 14b.

Lorsque $D_s\theta < 1$ km ou $D_s < 50$ km, on peut s'attendre que le mécanisme de propagation dominant soit la diffraction et non pas la diffusion vers l'avant.

D'autres travaux sur la prévision de la qualité du fonctionnement des systèmes de transmission par diffusion, à partir de données météorologiques, sont décrits dans [Gjessing et McCormick, 1974]. La méthode envisagée demande un complément d'étude pour déterminer quelle est sa valeur pratique.

## 7. Influence de la fréquence

Il est généralement admis que la médiane de l'affaiblissement de transmission à long terme par rapport à l'espace libre augmente proportionnellement à la fréquence $f$ (voir aussi le § 2), jusqu'à environ 3 GHz.

Pour des mesures dont la période d'échantillonnage est inférieure à 1 heure, la loi selon laquelle l'affaiblissement de transmission dépend de la fréquence varie entre $f^2$ et $f^{-1/3}$ [Ecklund et Wickerts, 1968].

Des mesures effectuées en France [Win Tin et Battesti, 1978] à 460 et 2220 MHz et sur deux distances, 325 et 165 km, montrent que l'augmentation de l'affaiblissement par rapport à l'espace libre, en fonction de la fréquence:

– est plus grande sur la liaison longue, où la loi est $f^2$ pendant 1% du temps et $f$ pendant 99% du temps, que sur la liaison courte, où la loi est $f^{1,5}$ pendant 1% du temps et $f^{0,5}$ pendant 99% du temps;

– est un peu plus grande l'été que l'hiver; cette différence est plus marquée sur la liaison courte;

– est d'autant plus petite, en moyenne, que le signal est reçu à un niveau plus bas.

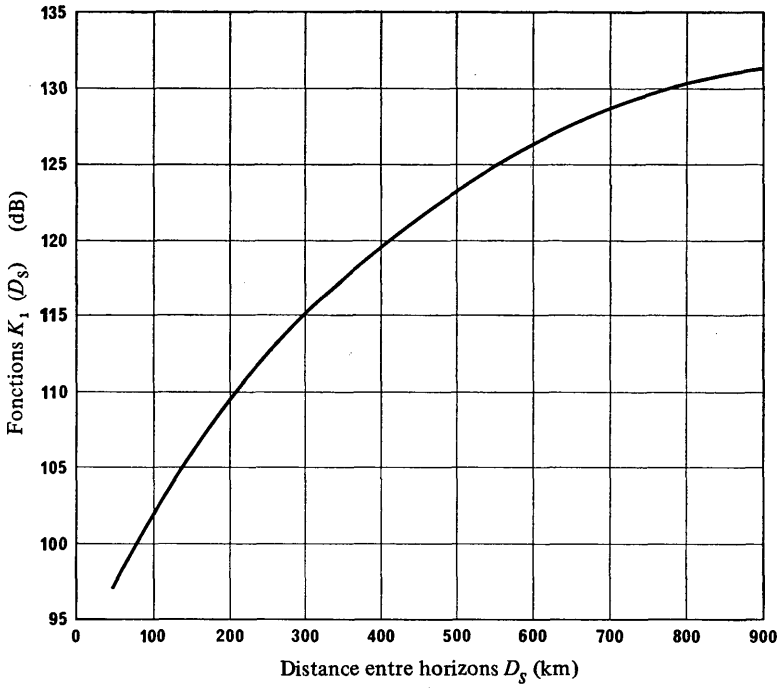



FIGURE 14*a*

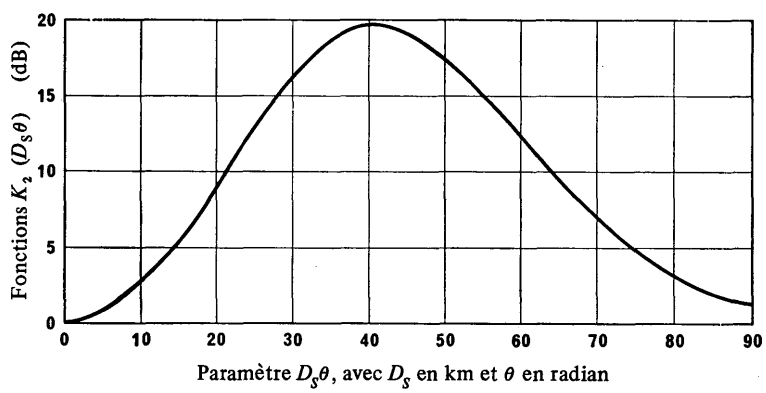



FIGURE 14*b*

Des mesures faites en Inde [Majumdar et Sarkar] sur 120 MHz et 2 GHz ont montré que l'affaiblissement de transmission par rapport à l'affaiblissement en espace libre croît la plupart du temps proportionnellement à la fréquence (gradients du coïndice compris entre $-40$ et $-157$ unités $N$/km). Pour de petits pourcentages du temps, l'exposant de la fréquence tombe au-dessous de l'unité et prend même parfois des valeurs négatives.

Au-dessus de 10 GHz, l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau atmosphériques sur les trajets transhorizon n'est pas négligeable. Le Rapport 720 indique comment on peut déterminer les affaiblissements dans une atmosphère ayant une humidité absolue moyenne. Des mesures faites en République fédérale d'Allemagne [Abel, 1972] à la fréquence de 12 GHz, sur un trajet de 210 km, ont montré que, pendant les petits pourcentages du temps, les précipitations ont pour effet, soit d'augmenter l'affaiblissement de transmission par absorption, soit de le diminuer par diffusion, selon la position des cellules de précipitation sur le trajet.

## 8. Réception en diversité

Les évanouissements profonds qui accompagnent la propagation par diffusion diminuent sérieusement les performances des systèmes qui reposent sur ce mode de propagation. On peut atténuer les effets des évanouissements en recourant à la réception par diversité, qui consiste à faire usage de deux signaux ou davantage, dont les évanouissements sont plus ou moins indépendants en raison des différentes longueurs des trajets, des fréquences ou des instants d'émission. L'effet de la diversité d'espace a été étudié en République fédérale d'Allemagne [Fehlhaber et Grosskopf, 1967] 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 approprié entre les deux 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 appropriés $\Delta_y$ (m) et $\Delta_z$ (m) sont alors donnés, pour des fréquences supérieures à 1000 MHz, par les relations

$$\Delta_y = 0{,}36\,(D^2 + 4l_y^2)^{1/2} \qquad (10)$$
$$\Delta_z = 0{,}36\,(D^2 + l_z^2)^{1/2}$$

Des mesures ont conduit aux valeurs suivantes:

$$l_y \simeq 20 \text{ m}, \quad l_z \simeq 15 \text{ m}.$$

On peut encore employer la diversité de fréquence. On a trouvé [Fehlhaber, 1967] qu'une valeur convenable pour la différence de fréquence, $\Delta f$, (MHz) est:

$$\Delta f = (1{,}44 f/\delta d)\,(D^2 + l_z^2)^{1/2} \qquad (11)$$

expression dans laquelle $f$ (MHz) est la fréquence porteuse, $\delta$ (mrad) 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 la fréquence avec la longueur du trajet a été étudiée en France [Fehlhaber, 1967].

Il est encore possible de recourir à la diversité angulaire, en alimentant par un dispositif multiple 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 de la bande des ondes centimétriques [Surenian, 1965]. Une autre mesure relative à la diversité angulaire, effectuée au Japon [Iwasa et Kurobe, 1974] sur un trajet maritime de 256 km à 1,8 GHz, a montré qu'une séparation supérieure à environ 6 mrad entre les faisceaux donne un coefficient de corrélation suffisamment faible, inférieur à 0,4. On en conclut que les résultats obtenus avec la diversité angulaire sont comparables à ceux de la diversité de fréquence, bien qu'il y ait une légère augmentation de l'affaiblissement de transmission.

Il est peu probable que l'emploi de la diversité de polarisation puisse être de quelque utilité pratique, car on constate que la polarisation se conserve bien, tandis que l'affaiblissement de transmission ne semble pas dépendre du fait que l'on a employé la polarisation verticale ou horizontale.

## 9. Gain de l'antenne pour le trajet

Le gain global des antennes d'émission et de réception peut être inférieur à la somme de leurs gains individuels pour des ondes planes. Cette diminution apparente du gain est appelée «baisse de gain» ou «perte par couplage entre l'antenne et le milieu». L'analyse théorique [NBS, 1967] montre que la perte dépend du gain des antennes et de la longueur du trajet.

On a observé expérimentalement que le gain des antennes pour le trajet ou gain effectif total d'antenne sur une liaison transhorizon est pratiquement indépendant de la distance, entre 150 et 500 km environ [Boithias et Battesti, 1964]. D'autre part, on peut considérer que le gain effectif total (Fig. 15) dépend exclusivement de la somme des gains des antennes en espace libre, sans corrections importantes, à condition qu'aucun des gains en espace libre ne dépasse 55 dB environ, et que les gains des deux antennes ne soient pas trop différents.

Si l'on utilise des antennes à gain très élevé, le gain effectif total d'antenne (gain des antennes 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 baisse du gain d'antenne semble diminuer et devient très faible à 1000 km environ [Battesti et Boithias, 1971].

Des mesures faites au Royaume-Uni [Hall et Misme, 1975] sur deux trajets de 300 km, à la fréquence de 2 GHz, ont révélé une baisse de gain pour une antenne ayant un gain de 53 dB; pour les cas les plus importants d'une faible puissance à la réception (99% des niveaux), on a constaté que la Fig. 15 donnait des résultats trop favorables de plusieurs dB. On peut s'attendre que cette variation soit moins importante avec des antennes ayant des gains plus petits.

Des recherches faites en U.R.S.S. [Troitsky, 1970 et 1971; Petrushko et autres, 1975; Troitsky et autres, 1977] ont montré que, dans le cas général des antennes asymétriques ou des antennes ayant des gains très différents, la baisse de gain $\delta$ peut se calculer par la formule:

$$\delta = -5 \log\left[1 + \left(\frac{\theta_v}{\alpha_{v_1}}\right)^2\right] - 5 \log\left[1 + \left(\frac{\theta_v}{\alpha_{v_2}}\right)^2\right] - 5 \log\left[1 + \left(\frac{\theta_h}{\alpha_h}\right)^2\right] \quad \text{dB} \qquad (12)$$

avec:

$$\alpha_h = \frac{\alpha_{h_1} \cdot \alpha_{h_2}}{\sqrt{\alpha_{h_1}^2 + \alpha_{h_2}^2}} \qquad (13)$$

où

$\alpha_{v1}$, $\alpha_{h1}$: ouverture du faisceau de l'antenne d'émission, dans les plans vertical et horizontal (au niveau de 3 dB);

$\alpha_{v2}$, $\alpha_{h2}$: même signification que ci-dessus, pour antenne de réception, et

$\theta_h$, $\theta_v$ sont les largeurs angulaires du volume de diffusion troposphérique, respectivement dans les plans horizontal et vertical.

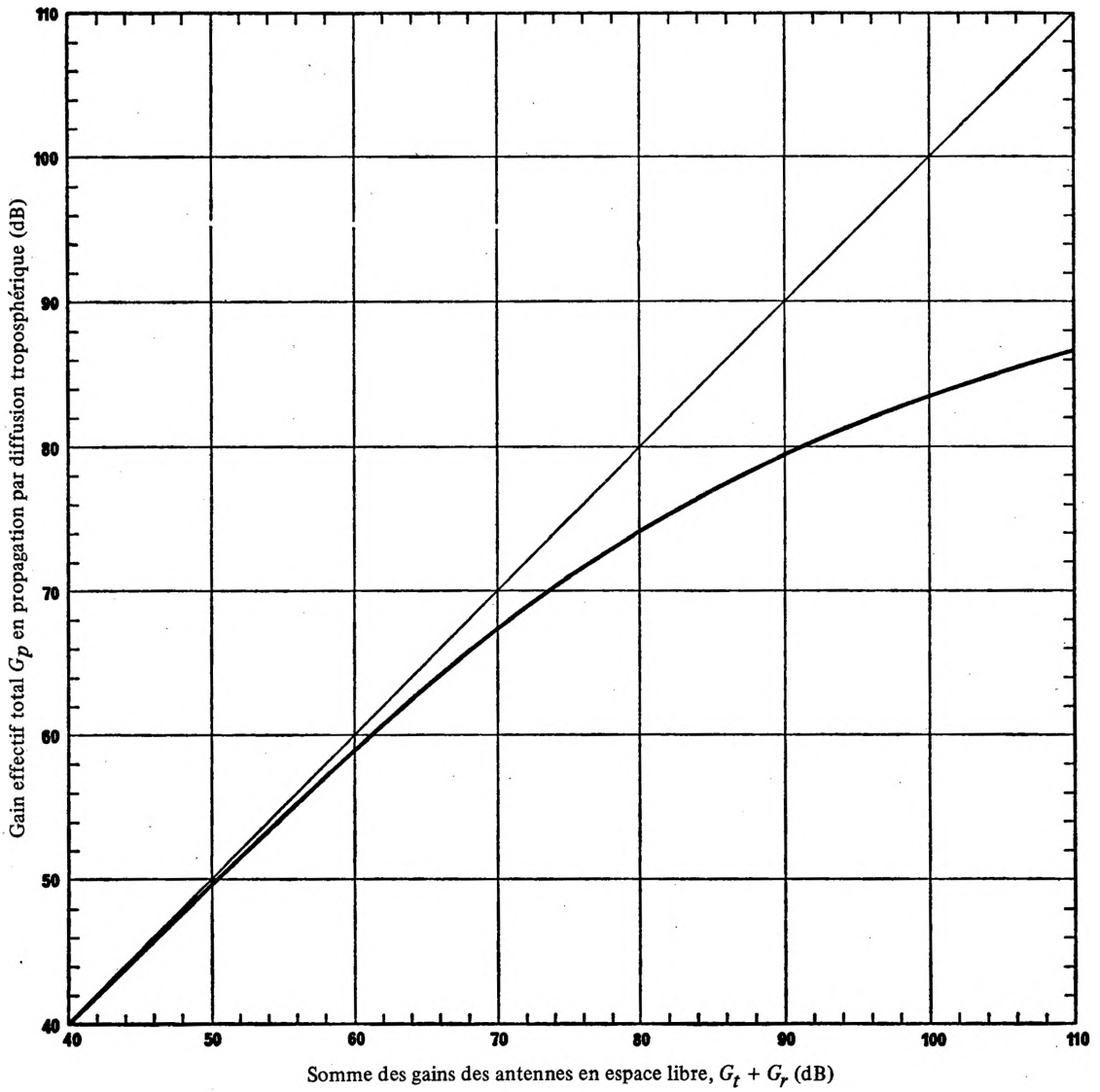



FIGURE 15

Les valeurs de $\theta_h$ et $\theta_v$ sont tirées d'essais effectués avec des antennes à balayage à faisceau très étroit. Selon [Troitsky, 1971 et Petrushko et autres, 1975], $\theta_h \simeq 1°$ et $\theta_v \simeq 1{,}7°$. Pour des antennes symétriques identiques, le calcul de la baisse du gain d'antenne par la formule (12), compte tenu des valeurs précitées de $\theta_h$ et $\theta_v$, donne pour $\delta$ des valeurs qui coïncident avec les valeurs calculées au moyen de la courbe de la Fig. 15.

Dans le calcul de signaux de haut niveau dus à la diffusion, les baisses du gain d'antenne sont à déterminer à l'aide de la formule (12), avec $\theta_h = 0$ et $\theta_v = 1{,}7°$.

Pour des signaux de haut niveau dus à d'autres mécanismes de propagation tels que le guidage, il pourrait ne pas y avoir de baisse du gain (Rapport 569-1).

La République Populaire de Chine a présenté une méthode de calcul pour exprimer la relation physique entre le gain d'antenne pour le trajet et les paramètres du trajet [CCIR, 1974-1978a].

## 10. Fréquence des évanouissements

La rapidité des évanouissements est un facteur important, surtout lorsqu'il s'agit de transmettre des signaux numériques. Ce facteur a été étudié, en République fédérale d'Allemagne [Fehlhaber et Grosskopf, 1966 et 1967; Grosskopf et Fehlhaber, 1962], du point de vue de la fonction d'autocorrélation dans le temps, ce qui conduit à une «fréquence moyenne d'évanouissement». Cette grandeur fournit une mesure de la rapidité des évanouissements. Elle varie de manière statistique entre 0,0444 fois sa médiane (pendant 99% du temps) et 4,3 fois sa médiane (pendant 1% du temps). La 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, elle diminue légèrement lorsque les diamètres des antennes augmentent. A 12 GHz, pendant que s'exerce l'influence de la pluie, on a observé des fréquences d'évanouissement allant jusqu'à environ 20 Hz [Abel, 1972].

Des mesures effectuées au Royaume-Uni [Hall, 1973] à la fréquence 2 GHz, sur deux trajets de 300 km, ont montré comment varie la distribution de la rapidité d'évanouissement en fonction des variations du niveau médian. Lorsque les niveaux médians de l'affaiblissement le long du trajet étaient inférieurs de plus de 45 dB au niveau en espace libre, on n'observait pas plus de trois évanouissements par minute; en revanche, si les niveaux médians de l'affaiblissement étaient inférieurs de plus de 75 dB au niveau en espace libre, la médiane de la rapidité d'évanouissement était d'environ 30 évanouissements par minute pour un intervalle de variation compris entre 6 et 120 évanouissements par minute.

De même, des mesures ont été faites pendant 13 mois aux Etats-Unis d'Amérique à 186 MHz sur des trajets terrestres de 376 et 633 km [Dougherty et autres, 1970]. Quand le signal atteignait approximativement son niveau médian horaire à long terme (65 dB au-dessous du niveau en espace libre), il subissait un évanouissement rapide (durée d'évanouissement de l'ordre d'une dizaine de secondes) habituellement associé à la diffusion troposphérique. Quand le niveau médian horaire dépassait le niveau médian à long terme de 15 dB ou plus (pendant 5% de toutes les heures), la rapidité d'évanouissement décroissait et la durée d'évanouissement atteignait quelques minutes. Quand le niveau médian horaire dépassait le niveau médian à long terme de 25 dB ou plus (pendant 1% de toutes les heures), l'évanouissement disparaissait pratiquement. 90% de ces niveaux mesurés du signal se trouvaient entre les limites prévues [NBS, 1967].

## 11. Largeur de bande transmissible

Les diverses hétérogénéités qui produisent la propagation par diffusion créent autant de trajets de propagation différents, variables en nombre et en temps de transmission. Il en résulte que les coefficients de transmission pour deux fréquences voisines ne sont pas entièrement corrélés, d'où une distorsion du signal transmis. La largeur de bande transmissible est la bande de fréquences à l'intérieur de laquelle la distorsion due à ce phénomène est acceptable pour le signal transmis. Cette largeur de bande dépend donc à la fois de la nature du signal transmis (multiplex téléphonique, image de télévision, etc.) et de la distorsion admissible pour ce signal. Des études effectuées en France [Battesti et Boithias, 1971] montrent que:

- l'augmentation du gain des antennes élargit la bande transmissible dans la mesure où il y a aussi accroissement de la baisse de gain (c'est-à-dire pour des gains supérieurs à environ 30 dB);
- les autres conditions restant égales, la largeur de bande transmissible dépend de la structure de l'atmosphère et donc de la zone climatique considérée;
- la largeur de bande transmissible diminue lorsque la distance augmente, mais suivant une loi qui n'est pas la même dans tous les climats;
- la largeur de bande transmissible est plus petite si l'angle de départ est positif; elle est plus grande si cet angle est négatif.

## 12. Influence de l'emplacement des stations

L'emplacement des liaisons utilisant la transmission transhorizon demande à être choisi avec un certain soin. Les faisceaux d'antenne ne doivent pas être masqués par des obstacles proches et doivent être pointés légèrement au-dessus de l'horizon. La valeur précise de l'inclinaison optimale des faisceaux d'antenne vers le haut dépend du trajet et des conditions atmosphériques, mais cette inclinaison au-dessus de l'horizon est comprise entre environ 0,2 et 0,6 fois l'ouverture du faisceau de l'antenne [Hirai et autres, 1963]. On a effectué au Royaume-Uni [Hall, 1973] des mesures dans lesquelles on utilisait une antenne ayant un gain de 53 dB, dont on écartait le faisceau de la direction de l'horizon (grand cercle) de deux émetteurs de 2 GHz, chacun d'eux distant de 300 km; on constata que la puissance reçue diminuait de 9 dB par degré. Cela s'accompagnait d'une augmentation de l'angle de diffusion sur les trois premiers degrés, aussi bien en azimut qu'en site, pour chaque trajet, et dans une gamme étendue de pourcentages du temps.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABEL, N. [janvier 1972] Beobachtungen an einer 210 km langen 12 GHz-Strecke (Observations sur une liaison de 210 km à 12 GHz). *Techn. Ber. FTZ*, A 455 TBr 34.

BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [janvier-février 1971] Nouveaux éléments sur la propagation par les hétérogénéités de l'atmosphère. *Ann. des télécomm.*

BATTESTI, J., BOITHIAS, L. et MISME, P. [mai-juin 1968] Calcul des affaiblissements en propagation transhorizon à partir des paramètres radiométéorologiques. *Ann. des télécomm.*

BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [septembre-octobre 1964] Etude expérimentale de la baisse de gain d'antenne dans les liaisons . transhorizon. *Ann. des télécomm.*

BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [juillet-août 1965] Les Faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité. *Ann. des télécomm.*

DOUGHERTY, H. T., McGAVIN, R. E. et KRINKS, R. W. [1970] An experimental study of the atmospheric conditions conductive to high radio fields. Access No. COM-75-11138, NTIS, Springfield, Va., USA.

EKLUND, F. et WICKERTS, S. [novembre 1968] Wavelength dependence of microwave propagation far beyond the radio horizon. *Radio Science*, 3, 11.

FEHLHABER, L. [1967] Selektiver Schwund, übertragbare Bandbreite und Frequenz-diversity auf troposphärischen Scatterstrecken im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 10 GHz (Evanouissements sélectifs, largeur de bande transmissible et diversité de fréquence sur les faisceaux hertziens à diffusion troposphérique entre 1 et 10 GHz). *Tech. Rev. FTZ*, 5589.

FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1er mars 1966] Die mittlere Schwundfrequenz auf Scatterstrecken im Frequenzbereich 1 GHz bis 10 GHz (La fréquence moyenne d'évanouissement sur les faisceaux hertziens transhorizon fonctionnant dans la bande 1 à 10 GHz). *Techn. Ber. FTZ.*, **5582**.

FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1967] Das Elektromagnetische Feld am Empfangsort einer troposphärischen Scatterstrecke, I und II (Le champ électromagnétique à la station de réception d'un faisceau hertzien transhorizon I et II). *NTZ*, **20**, 511-520 et 649-657.

GJESSING, D. T. et McCORMICK, K. S. [1974] On the prediction of the characteristic parameters of long-distance tropospheric communication links. *IEEE Trans. Com.*, Vol. COM-22, 1325-1331.

GROSSKOPF, J. et FEHLHABER, L. [1962] Häufigkeit und Dauer einzelner Schwundeinbrüche bei troposphärischen Scatterstrecken (Fréquence et durée des évanouissements profonds sur les liaisons par diffusion troposphérique). *NTS*, **2**, 71.

HALL, M. P. M. [1973] Statistics of high-level beyond-horizon signals at 2.2 GHz and 2.6 GHz, and measurements of the variation of the arrival angle structure. AGARD Conference Proceeding, N° 127, Doc. N° 17.

HALL, M. P. M. et MISME, P. [1975] Gain degradation on a 25 m paraboloidal aerial on 2 GHz transhorizon radio paths. *Proc. IEE.*, Vol. 122, page 358.

HIRAI, M., KURJHARA, Y., INOUE, R., NIWA, S., IKEDA, M. et KIDO, Y. [septembre 1963] Transmission loss in VHF and UHF overland propagation beyond the horizon. *Journal Radio Res. Labs.*, Vol. 10.

IWASA, H. et KUROBE, A. [1974] Experimental results of angle diversity effect in transhorizon radio-relay system. *Trans. IECE Japan*, 57-B, 9.

MAJUMDAR, S. C. et SARKAR, S. K., Transhorizon propagation characteristics at 2 GHz and 120 MHz in Northern India. Based on CENTROP-9. Report n° 9. Centre of Research on Troposphere, Radio Science Division, National Physical Laboratory, New Delhi-110012 (Inde).

NBS [1967] National Bureau of Standards, Technical Note N° 101, révisée, I et II, AD 687820 et AD 687821. National Technical Information Service, Springfield, Va (USA).

PETRUSHKO, I. I. et TROITSKY, V. N., [1975] Issledovanié statistitcheskikh kharakteristik signala santimetrovykh voln na na trassé dlinoi 430 km (Etude des caractéristiques statistiques des signaux en ondes centimétriques sur un trajet de 430 km). *Troudy NIIR*, **1**.

SURENIAN, D. [juin 1965] Experimental results of angle diversity system tests. *IEEE Trans. Com. Tech.*, COM-13, **2**,208.

TROITSKY, V. N., [1970] Vliianie napravlennosti antenn na ouroven i flouktouatsi signala pri DTR (Influence de la directivité de l'antenne sur le niveau du signal et sur les fluctuations du signal dans la propagation troposphérique à grande distance). *Elektrosviaz*, **8**.

TROITSKY, V. N., [1971] Optimalnié razmery i forma antenn pri dalnem troposfernom rasprostranenii UKV (Dimensions et forme d'antenne optimales pour la diffusion troposphérique à grande distance, en ondes métriques). *Elektrosviaz*, **7**.

TROITSKY, V. N., SKUZ, A. A., [1977] Issledovanic nesimmetzitchnich antenn na troposfernich linijack (Recherches sur les antennes non symétriques pour les liaisons à diffusion troposphérique). *Elektrosviaz*, **7**.

WIN TIN, J. et BATTESTI, J. [1978] Etude expérimentale de l'influence de la fréquence sur la propagation par diffusion troposphérique. A paraître dans *Ann. des télécomm.*

WVEDENSKY, B., Ed. [1965] *Propagation transhorizon en ondes métriques.* Sovietskove Radio.

*Document du CCIR*

[1974-78] a. 5/247 (République Populaire de Chine).

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5F: ASPECTS RELATIFS AUX SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES

*Avis et Rapports*

RAPPORT 426-2

## MÉTHODES DE PRÉVISION DU BRUIT RADIOÉLECTRIQUE ET DE L'ABSORPTION ET LA RÉFRACTION DES ONDES EU ÉGARD AUX SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE

**Rassemblement des données**

(Programme d'études 5C-3/5)

(1970 - 1974 - 1978)

Le Programme d'études 5C-3/5 demande que l'on mette au point des méthodes pour prévoir le bruit radioélectrique ainsi que l'absorption et la réfraction des ondes radioélectriques, eu égard aux systèmes de télécommunication spatiale.

Le Rapport 564-1 contient une réponse provisoire à cette demande, mais il est bien évident que l'on devra continuer à recueillir des résultats de mesure si l'on veut améliorer la précision et étendre le champ d'application des moyens de prévision qui y sont exposés.

En conséquence, les administrations sont instamment priées d'entreprendre des mesures radioélectriques à long terme, notamment à des fréquences supérieures à 10 GHz, en y associant autant que possible des mesures des taux de précipitation. Les données radioélectriques peuvent être recueillies par des mesures directes, la source de signaux étant le Soleil ou une radiobalise montée sur satellite et par des mesures indirectes du bruit d'origine céleste ou de l'affaiblissement (au moyen d'un radar). On a des raisons de penser que les radiomètres constituent un moyen simple et suffisamment précis pour obtenir des données statistiques sur l'affaiblissement le long de trajets obliques. Les mesures pluviométriques devraient de préférence indiquer comment le taux de précipitation global se répartit entre les deux grands types de pluie, à convexion et à stratification.

Les administrations sont priées aussi de communiquer les résultats de leurs mesures au Directeur du CCIR qui, au moment opportun, assurera la publication de toutes les données recueillies.

L'utilité des diverses contributions se trouverait grandement accrue si les administrations voulaient bien présenter les résultats de leurs mesures en les récapitulant comme indiqué dans les Tableaux A ci-après.

Il conviendrait également de fournir des renseignements sur les points suivants:

- amélioration à attendre des techniques de diversité d'emplacement;
- corrélation entre l'affaiblissement et le bruit;
- affaiblissement linéique (dB/km) le long de trajets obliques.

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 (par intervalle)(2) de _____° à _____°
5. Fréquence des signaux radioélectriques _____ GHz
6. Type de l'antenne et de son alimentation, à la station de mesure _____
7. L'antenne est-elle protégée par un radôme? (oui ou non) _____
8. Ouverture du faisceau d'antenne aux points à – 3 dB _____
9. Durée fixe de chaque prélèvement d'échantillon des données _____
10. Période totale de la campagne de mesures: du (jour, mois, année) _____
    au (jour, mois, année) _____
11. Nombre total d'heures entières de mesure _____
12. Indiquer si les statistiques pluviométriques associées correspondent:
    – à un seul emplacement (oui ou non) _____
    ou
    – à un trajet de longueur finie (oui ou non) _____
    si oui, la longueur de ce trajet _____ km
13. Type de pluviomètre (ou autre appareil de mesure de la pluie) utilisé _____
14. Temps d'intégration du ou des pluviomètres utilisés _____ secondes

A1

| | | (X) Affaiblissement (dB) supplémentaire par rapport à sa valeur en espace libre<br>(Y) Taux de précipitation (mm/h) dépassé pendant les pourcentages des temps suivants | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 99,9 | 99 | 90 | 50 | 10 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |
| Valeur sur la période totale | X | | | | | | | | | |
| | Y | | | | | | | | | |
| Mois où la valeur a été maximale | X | | | | | | | | | |
| | Y | | | | | | | | | |

A2

| | | (X) Bruit (K) dépassé pendant les pourcentages du temps suivants<br>(Y) Taux de précipitation (mm/h) dépassé pendant les pourcentages des temps suivants | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 99,9 | 99 | 90 | 50 | 10 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |
| Valeur sur la période totale | X | | | | | | | | | |
| | Y | | | | | | | | | |
| Mois où la valeur a été maximale | X | | | | | | | | | |
| | Y | | | | | | | | | |

(1) Par exemple, le Soleil, des radiobalises montées sur satellite, un bruit d'émission, etc.

(2) Il est suggéré que les données radioélectriques mesurées du bruit soient classées en plusieurs intervalles de l'angle de site: $< 5°$ , $5–15°$ , $15–30°$ , $30–60°$ , $60–90°$ .

A3

| | Réfraction (degrés d'arc) dépassée pendant les pourcentages du temps suivants | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 99,9 | 99 | 90 | 50 | 10 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |
| Valeur sur la période totale | | | | | | | | | |

A4

| Durée des évanouissements (minutes) | Nombre des évanouissements dépassant une profondeur donnée (par échelon de 2 dB) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | |
| 0,1 | | | | | | | | | | |
| 0,3 | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | |

---

RAPPORT 564-1 *

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION SPATIALE

(Programme d'études 5C-3/5)

(1974 - 1978)

### 1. Introduction

Quand on étudie une liaison Terre-espace pour un système de télécommunication spatiale, il faut tenir compte notamment des effets suivants:

*a)* absorption par les gaz atmosphériques; absorption, diffusion et dépolarisation par les hydrométéores (gouttes d'eau et de glace en précipitation, nuages, etc.) et bruits émis par des milieux absorbants (appelés ci-après «bruit d'émission»), tous effets qui sont particulièrement importants aux fréquences supérieures à 10 GHz environ;

*b)* affaiblissement des signaux, dû à une divergence du faisceau de l'antenne de la station terrienne, qui est causée par la réfraction normale dans l'atmosphère;

*c)* diminution du gain d'antenne équivalent, due à une distorsion de phase dans l'ouverture de l'antenne, qui est causée par des irrégularités dans le champ de l'indice de réfraction;

*d)* évanouissements relativement lents dus à la courbure du faisceau, qui est causée par des variations de l'indice de réfraction à une grande échelle; évanouissements plus rapides (scintillation) et variations de l'angle d'arrivée dus à des fluctuations de l'indice de réfraction à une petite échelle;

*e)* limitations éventuelles de la largeur de bande dues à une diffusion multiple ou une propagation par trajets multiples, en particulier dans les systèmes numériques de grande capacité;

*f)* affaiblissement dû à l'environnement local (bâtiments, arbres, etc.) de la station terrienne.

Les caractéristiques fondamentales de ces effets sont examinées dans la Section 5C de ce Volume. Le présent Rapport traite des données de propagation nécessaires à l'étude d'un système.

### 2. Effets de la réfraction normale

La diminution régulière de l'indice de réfraction, avec l'élévation en altitude, fait que le rayon s'incurve et que, par suite, le faisceau se défocalise et change de direction, effets dont il faut tenir compte aux petits angles de site.

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 2, 4, 7, 8, 10 et 11.

L'ampleur du phénomène de défocalisation du faisceau de l'antenne a été évaluée [Yokoi et autres, 1970; Crane, 1971]. L'affaiblissement correspondant est indépendant de la fréquence et inférieur à 0,4 dB pour un angle de site de 3°, même aux très grandes valeurs du coïndice de réfraction au sol. Par rapport à l'affaiblissement dû à d'autres causes, il est donc peu vraisemblable qu'on doive en tenir compte beaucoup dans la conception des systèmes.

La question des erreurs causées à l'angle de site par la réfraction est traitée dans le Rapport 718. Dans une atmosphère maritime tropicale, la réfraction angulaire totale (c'est-à-dire l'augmentation de l'angle de site apparent) est de 0,65, 0,35 et 0,25° environ pour des angles de site respectifs de 1°, 3° et 5°. Dans un climat continental polaire, les valeurs correspondantes sont respectivement de 0,44, 0,25 et 0,17°. Les valeurs pour les autres climats se situent entre ces deux extrêmes. On peut évaluer l'intervalle de variation de l'angle de site apparent au moyen des données statistiques du coïndice au niveau du sol, $N_S$ [CCIR, 1974-78a]; cette variation journalière est de l'ordre de 0,1° (valeur efficace) pour un angle de site de 1°, mais elle diminue rapidement lorsque l'angle de site augmente. Les fluctuations à plus court terme dues à des modifications de la variation altimétrique du coïndice peuvent être de l'ordre de 0,02° (valeur efficace) pour un angle de site de 1°; mais, ici encore, elles décroissent rapidement lorsque l'angle de site augmente. Dans la pratique, il est difficile de distinguer entre l'effet des modifications à court terme de la distribution du coïndice de réfraction en fonction de l'altitude et l'effet d'irrégularités aléatoires superposées à cette distribution.

### 3. Réduction du gain de l'antenne due à un défaut d'incohérence du front de l'onde

Cet effet (voir le point *c)* du § 1) diminue lorsque l'angle de site augmente et il s'amplifie avec la fréquence; en outre, il est fonction du diamètre de l'antenne. Des mesures faites au Japon avec une antenne de 22 m [Yokoi et autres, 1970] semblent indiquer que, pour un angle de site de 5°, l'affaiblissement du signal varie entre 0,2 et 0,4 dB à 4/6 GHz. Des mesures faites avec une antenne de 7 m, à 15,5 et 31,6 GHz, ont donné des valeurs d'affaiblissement respectivement de 0,3 et 0,6 dB pour un angle de site de 5° [Yamada et Yokoi, 1974]. Il est probable que, dans la pratique, cet effet ne soit important que pour de grandes antennes, des fréquences élevées et des angles de site inférieurs à 5°.

### 4. Variation du signal en l'absence de précipitation, y compris la scintillation et les effets d'une propagation par trajets multiples

Comme on le fait observer dans le Rapport 718, il est peu probable que la diffusion troposphérique, en l'absence de précipitation, cause des évanouissements profonds dans des systèmes de télécommunication spatiale fonctionnant à des fréquences inférieures à 10 GHz et des angles de site de plus de 10°. Cependant, les scintillations ionosphériques peuvent être considérables à des fréquences inférieures à 6 GHz environ et, parfois, à de petits angles de site. Malheureusement, et bien que plusieurs expériences importantes sur l'affaiblissement dû aux scintillations aient été réalisées récemment au moyen d'émissions de satellite, il n'est pas encore possible d'évaluer les caractéristiques statistiques de ce type d'évanouissement d'une manière suffisamment fiable. C'est pourquoi l'information présentée ici est d'un caractère général seulement, en attendant que des données plus détaillées aient été recueillies sur de plus longues périodes et pour différentes conditions climatiques.

#### 4.1 *Mesures faites au moyen du satellite ATS-6 (angle de site ≈ 22°)*

Plusieurs organismes ont fait état récemment de résultats obtenus au moyen d'émissions du satellite d'application technologique (ATS-6) en position géostationnaire au-dessus de l'Afrique. (Les données obtenues à de petits angles de site à partir du même satellite, pendant son transfert, sont résumées au § 4.2.)

On trouvera au Tableau I le résumé des données sur la scintillation obtenues entre août 1975 et août 1976 par des chercheurs du Royaume-Uni et des Pays-Bas au moyen d'émissions du satellite géostationnaire, sous des angles de site, $\theta$, de 21° à 25°. Les groupes du Royaume-Uni utilisaient des antennes de 6 m de diamètre, tandis qu'aux Pays-Bas l'antenne utilisée avait un diamètre de 3 m.

Il existe entre les données recueillies une concordance approximative; on peut en conclure qu'à un angle de site de 20° à 30°, dans un climat tempéré, la profondeur des évanouissements causés par les scintillations est de l'ordre de 1 dB (de crête à crête) par temps clair en été, de 0,2 à 0,3 dB en hiver et de 2 à 4 dB (très occasionnellement de 6 dB) avec certains types de nuage. Les données relatives à la rapidité des évanouissements sont assez peu concluantes. Les fortes scintillations observées dans certaines conditions de nébulosité ont souvent une cadence de fluctuation de 0,5 à 1 Hz; certains observateurs ont néanmoins décelé des composantes de plus haute cadence (jusqu'à 10 Hz au moins). A la suite d'observations faites à 20 et 30 GHz à un angle de site de 23°, on a constaté entre les scintillations à ces deux fréquences une corrélation temporelle généralement bonne. On a également relevé des évanouissements beaucoup plus lents, qui ont une période de 1 à 3 minutes et sont probablement causés par des variations de l'indice de réfraction à une échelle relativement grande.

#### 4.2 *Mesures à de petits angles de site ($\theta$ compris entre 0° et 10°)*

Des données de scintillation pour de petits angles de site ont été recueillies, au moyen du satellite ATS-6 et d'autres satellites, par plusieurs organismes dans le nord-ouest de l'Europe et en Amérique du Nord. Le Tableau II indique les principales de ces données. La plupart d'entre elles, comme celles du Tableau I, sont tirées des Actes du Colloque de l'URSI (Commission F) [CNET, 1977]. Des mesures antérieures effectuées au Canada au moyen de satellites, à 7 GHz [McCormick et Maynard, 1972], ont également été décrites.

TABLEAU I – *Données sur la scintillation obtenues au moyen du satellite ATS-6*

Résultats pour l'Europe publiés dans les Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, 1977

| Emplacement | $f$ (GHz) | Evanouissements dus aux scintillations |
|---|---|---|
| Royaume-Uni;<br>Martlesham, Suffolk.<br>$\theta = 23°$ | 20 et<br>30 | **Données pour 30 GHz (dB, de crête à crête)**<br>Généralement de 0,5 à 1 dB; 0,2 dB dans des conditions météorologiques calmes.<br>Occasionnellement de 2 à 6 dB pour de courtes salves, en relation avec des cumulus et des cumulo-nimbus.<br>(Les valeurs pour 20 GHz correspondent à 70% environ des valeurs indiquées ci-dessus). |
| Royaume-Uni,<br>Birmingham,<br>$\theta = 21°$ | 30 | Rarement plus de 0,5 dB par temps clair.<br>De 2 à 4 dB avec couche nuageuse épaisse.<br>En présence de précipitations, la scintillation est généralement moindre qu'en présence de nuages. |
| Pays-Bas; Eindhoven,<br>$\theta = 25°$ | 30 | De 1 à 2 dB par temps clair.<br>3 dB avec couche nuageuse. |
| Etats-Unis;<br>North Carolina,<br>$\theta = 42°$<br><br>[Ippolito, 1976] | 20 | 0,5 dB par temps clair.<br>3 dB avec couche nuageuse.<br>Salves courtes à fluctuations rapides de 3 dB. |

Les données du Tableau II font apparaître une augmentation nette de l'amplitude des évanouissements résultant de scintillations lorsque l'angle de site s'abaisse en dessous de 10° environ. En outre, parallèlement à l'augmentation de l'amplitude des fluctuations, qui sont relativement rapides, on trouve souvent, à de petits angles de site, un type d'évanouissement semblable à celui qui est observé sur des liaisons de Terre. Il se caractérise par des évanouissements profonds et soudains (de 20 dB par exemple et d'une durée de quelques secondes), qui manifestent un mécanisme de propagation par trajets multiples à deux composantes. Toutefois, d'après certaines données, des évanouissements de durée beaucoup plus longue se produisent aussi.

Il existe encore peu de données statistiques fiables pour les petits angles de site; on a cependant utilisé des mesures faites en été à Ottawa (Canada) comme indications provisoires pour la planification sous des climats tempérés continentaux. A un angle de site de 5°, à 7 GHz, la profondeur d'évanouissement dépasse 5,5 dB environ et 2,8 dB pendant respectivement 0,1% et 1% du temps. A un angle de 2° à 3°, la valeur 8 dB est dépassée pendant 1% du temps environ, tandis qu'à 1°, celle de 15 dB est dépassée pendant 1% du temps environ. On peut prévoir que 10% des évanouissements dépassant 15 dB durent plus de 30 s environ. Les données du Tableau II sont probablement représentatives de la bande de fréquences de 4 à 8 GHz, car plusieurs études ont montré que l'influence de la fréquence y est négligeable. Il faut d'ailleurs procéder avec prudence quand on applique ces courbes à d'autres climats et à des fréquences supérieures à 10 GHz. De plus, les données statistiques d'évanouissement pour la semaine ou le mois le plus défavorable peuvent être considérablement pires que les valeurs à long terme citées ci-dessus pour Ottawa [Strickland et autres, 1977]. La distribution cumulative des évanouissements observés dans les «périodes de deux heures les plus défavorables» est à peu de chose près une distribution de Rayleigh.

Dans certaines des mesures faites aux Etats-Unis, on a observé un élargissement prononcé du faisceau de l'antenne dans le plan vertical pour des angles de site inférieurs à 10° [Stutzman et autres, 1975]. Cet effet avait été attribué à une propagation par trajets multiples, mais il n'a pas été observé dans les expériences faites au Royaume-Uni, où le faisceau de l'antenne était beaucoup plus étroit.

Afin de réduire les marges de protection contre les évanouissements qui sont requises pour assurer une bonne fiabilité sur des liaisons fonctionnant à de petits angles de site, il peut falloir recourir à la diversité d'emplacement, en raison des effets des scintillations et d'une propagation par trajets multiples. On a suggéré d'espacer les antennes de plus de 300 m, perpendiculairement à la direction d'observation [CCIR, 1974-78b]. En outre, du fait des problèmes posés par la commande de puissance sur le trajet ascendant, l'éventualité d'évanouissements aux petits angles de site peut influencer beaucoup la conception des répéteurs (changeurs de fréquence) destinés à des stations spatiales accessibles à plusieurs stations terriennes.

Pour simuler les conditions d'une liaison Terre-espace, on a effectué [Thompson et autres, 1975] des mesures d'amplitude et de phase sur un trajet oblique (angle de site de 2,5°) entre des stations terminales situées à Hawaii à 64 km l'une de l'autre. Des évanouissements occasionnels de plus de 20 dB, superposés à des scintillations de plusieurs décibels, se sont ainsi manifestés.

TABLEAU II – *Données sur les évanouissements dus principalement aux scintillations, recueillies au moyen d'émissions de satellite, à de petits angles de site*

| Emplacement | Satellite | $\theta$ (degrés) | Données sur les évanouissements |
|---|---|---|---|
| Royaume-Uni Martlesham Suffolk | ATS-6 ; 30 GHz | 6,5<br>3,3<br>2,4 | 6,5 dB (de crête à crête) } Maximum dans des<br>10 dB (de crête à crête) } conditions de<br>18 dB (de crête à crête) } turbulence et de vent |
| | | 0,3 – 1,2 | Occasionnellement, évanouissements profonds de 20 dB |
| Royaume-Uni; Birmingham | ATS-6; 30 GHz | 1 – 2 | Renforcements lents et évanouissements brusques de 20 dB |
| Etats-Unis; Virginie [Stutzman et autres, 1975] | ATS-6; 20 GHz | 9 | De 2 à 3 dB avant et après des pluies légères |
| | | 4, 7 – 5, 1<br>4,5 | De 2 à 7 dB par temps brumeux<br>De 8 à 15 dB, nébulosité partielle |
| Etats-Unis; Ohio | ATS-6; 2 et 30 GHz | 2,8<br><br>0,38 | 3 dB à 2 GHz<br>15 dB à 30 GHz } Effet maximal dans<br>7 dB à 2 GHz } des cumulus<br>20 dB à 30 GHz |
| Etats-Unis; Massachusetts | IDCSP; 7 GHz | 10<br>3 | De 0,03 dB à 0,2 dB, valeur efficace.<br>Une valeur efficace de 10 dB a été observée occasionnellement en été.<br>Fluctuations de l'angle de site jusqu'à 0,01° pour 3° et jusqu'à 0,002° pour 10° (valeur efficaces pendant 5 minutes) |
| Canada; Eureka [Strickland et autres, 1977] | Anik II; 4 et 6 GHz | 1 | Données similaires aux deux fréquences. Evanouissements prévus de 11 et 20 dB pendant 1 % et 0,1 % du mois le plus défavorable. |
| Royaume-Uni; Goonhilly [Harris, 1977] | Satellite de l'océan Indien (INTELSAT IV) 4 et 6 GHz | 6,5 | 3 dB (de crête à crête) dépassés pendant 0,3 % du temps à 4 GHz, sur le trajet descendant, lors de mesures prises continûment pendant 9 mois. |
| Etats-Unis; Maryland [Ippolito, 1976] | ATS-6 ; 20 et 30 GHz | 2, 5 – 9 | 1,5 dB (de crête à crête) pour 9°, s'élevant à 11 dB pour 2,5°, à 30 GHz. Les valeurs correspondantes à 20 GHz sont égales à 40 à 70 % environ de celles à 30 GHz. Occasionnellement, évanouissements profonds pendant de légères pluies. |

4.3 *«Mois civil le plus défavorable»*

Des mesures de scintillation faites à un petit angle de site sur le réseau INTELSAT ont donné pour le mois civil le plus défavorable les résultats ci-après [Harris, 1977]: 4 dB et 3 dB (de crête à crête) pendant respectivement 0,1% et 1% du temps à 6 GHz avec un angle de site de 6,5°; 6 dB et 5,2 dB pendant respectivement 0,1% et 1% du temps sur un réseau combiné à 4 et 6 GHz (6 GHz pour le trajet montant et 4 GHz pour le trajet descendant). Une explication du terme «mois le plus défavorable» se trouve dans le Rapport 723.

4.4 *«Durée»*

Les mesures faites au Canada sur les évanouissements dus aux scintillations à de petits angles de site (voir le Tableau II) comprennent des observations relatives à la durée et à la vitesse de variation des évanouissements. Pour une fréquence de 6 GHz et à un angle de site de 1°, on a estimé que 90% des évanouissements dépassant 20 dB dureraient moins de 11 s environ et que 90% de ceux dépassant 12 dB dureraient moins de 35 s environ. La rapidité de variation du niveau du signal dépassait 1 dB/s pendant 1% du temps et 4 dB/s pendant 0,1% du temps.

## 5. Absorption due aux gaz atmosphériques

L'absorption due aux gaz atmosphériques est étudiée dans les Rapports 719 et 721. On trouve à la Fig. 2 du Rapport 719 des données relatives à l'absorption dans le plan vertical à des fréquences allant jusqu'à 340 GHz en atmosphère moyenne (7,5 g/m$^3$ de vapeur d'eau au sol). On peut calculer les valeurs pour tout autre angle de site supérieur à 5° environ en multipliant les données relatives à un trajet vertical par la cosécante de l'angle de site. Le Rapport 719 indique aussi la prépondérance de l'effet de la vapeur d'eau dans l'absorption totale aux fréquences différentes des raies d'absorption de l'oxygène (60 et 119 GHz).

On a établi [Bean et Dutton, 1966] des cartes montrant les variations saisonnières de l'humidité absolue au niveau du sol (voir aussi les Fig. 9a et 9b du Rapport 569-1). On peut utiliser ces cartes pour évaluer les variations saisonnières de l'affaiblissement par temps clair. Pour certaines régions des Etats-Unis, l'étendue du champ de variation de l'humidité est mise en évidence, par exemple par les valeurs de 0,1 g/m$^3$ et 26 g/m$^3$ qui sont dépassées pendant respectivement 99% du temps en février et 1% du temps en août.

## 6. Prévision de l'affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages

### 6.1 *Généralités*

Pour prévoir l'affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages sur un trajet oblique, il faut avoir des renseignements sur leur distribution spatio-temporelle et l'affaiblissement linéique (dB/km) correspondant. Le Rapport 563-1 contient des courbes de la distribution cumulative du taux de précipitation pluviale au sol pour cinq types de climat pluvieux. Ces courbes ne doivent s'utiliser pour un lieu déterminé qu'à défaut de données pertinentes pour ce lieu. Elles fournissent des valeurs moyennes pour les régions indiquées et l'on peut s'attendre à des écarts importants entre différents lieux se trouvant dans une même région et, pour un même lieu, d'une année à l'autre. En utilisant les données du Rapport 721 pour convertir le taux de précipitation (mm/h) en affaiblissement linéique (dB/km), on peut aussi en profiter pour évaluer l'affaiblissement qui devrait être dépassé pendant différents pourcentages du temps dans les divers climats, à condition de connaître la longueur de trajet à travers le milieu pluvial. On doit recourir à cette méthode puisque le Rapport 721 ne contient pas de données pluviométriques plus sûres pour les trajets Terre-espace (état de choses auquel il est urgent de remédier).

Pour déterminer les longueurs de trajet à travers un milieu pluvial, il faut distinguer entre les divers types de pluie, dont l'intensité de précipitation et l'étendue horizontale et verticale peuvent être très différentes, comme cela est décrit dans le Rapport 563-1.

La variabilité des caractéristiques de la pluie montre combien il est compliqué de prévoir l'affaiblissement le long de trajets obliques en se fondant sur des données statistiques de la pluviométrie à la surface du sol.

L'affaiblissement dû aux nuages de pluie ou au brouillard peut se calculer d'après les indications du Rapport 721 si l'on connaît leur teneur en eau liquide. Sauf pour ceux de grande teneur en eau liquide, l'affaiblissement total dû aux nuages n'est pas important; de toute façon, il est vraisemblable que les données statistiques mesurées en tiennent compte. Les effets des nuages de glace, la grêle sèche et la neige sont généralement négligeables aux fréquences considérées.

Pour étudier et prévoir les effets de la diversité d'emplacement, il convient de se référer au § 8 ci-après.

### 6.2 *Méthode générale de prévision*

Pour un trajet oblique issu d'un point donné avec un angle de site donné, on peut prévoir comme suit l'affaiblissement qui devrait être dépassé pendant un pourcentage du temps déterminé (moyenne sur plusieurs années). Si l'on ne peut pas se procurer de données autrement ou qu'on ne peut pas en calculer, on relève l'intensité de précipitation en surface (mesures discrètes), pour le pourcentage du temps spécifié, sur la Fig. 11 du Rapport 563-1 compte tenu des zones hydrométéorologiques de la Fig. 12 de ce même Rapport. On tire ensuite du Rapport 721 l'affaiblissement linéique (dB/km) correspondant à ce taux de précipitation. Pour déterminer l'affaiblissement à prévoir, on multiplie l'affaiblissement linéique par la longueur de trajet équivalente à travers la cellule de pluie. Les Fig. 1 et 2 du présent Rapport donnent les courbes de la longueur de trajet équivalente en fonction de l'angle de site avec, comme paramètre, le taux de précipitation. Ces courbes résument les données statistiques à long terme dont on dispose actuellement sur le taux ponctuel de précipitation et sur l'affaiblissement sur un trajet oblique, mesurés au même endroit et pendant la même durée. La Fig. 1 condense les données rassemblées dans le nord-ouest de l'Amérique du Nord, en Europe et dans d'autres pays [Evans, 1971; Turner, 1972; Robertson et Sukhia, 1972; Fimbel, 1975]. La Fig. 2 représente graphiquement des mesures effectuées à Tokyo [Kinase et Kimpara, 1973; Sato et autres, 1978].

Des mesures faites sur une période de trois ans à Yamaguchi (Japon), à un angle de site de 8°, ont donné pour la longueur de trajet équivalente des valeurs de 10 et 20 km respectivement pour des taux de précipitation de 65 et 25 mm/h et des pourcentages du temps de 0,01% et 0,1% [Yokoi et autres, 1976].

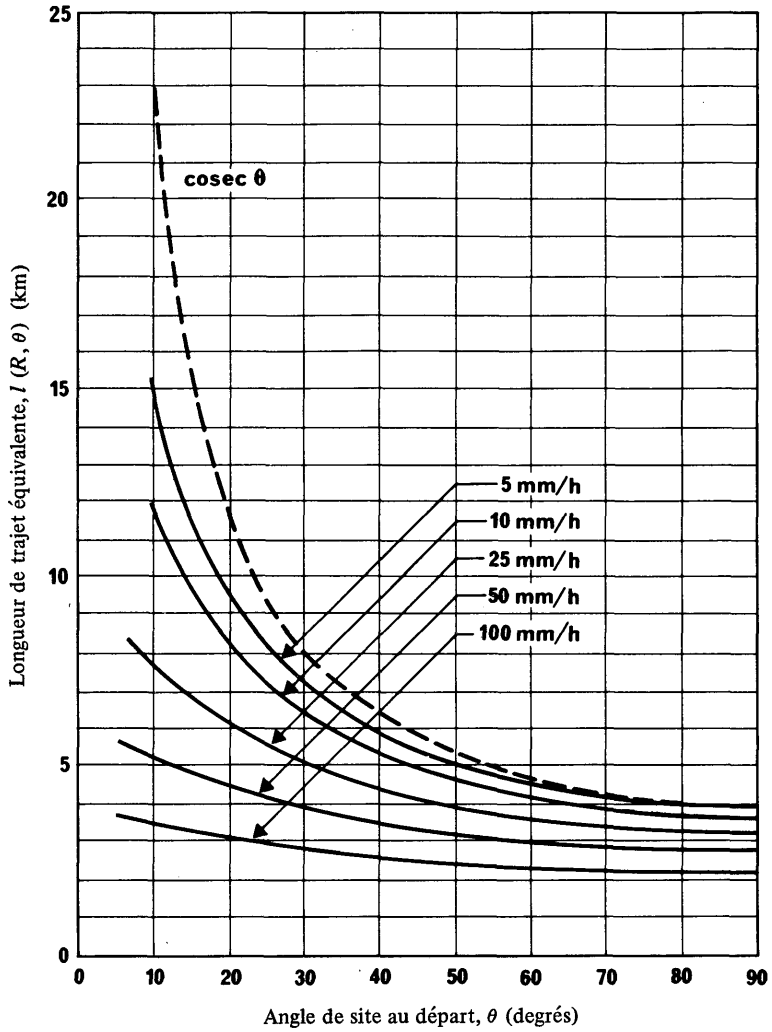



FIGURE 1 – *Longueurs de trajet équivalentes déterminées à partir de données rassemblées dans plusieurs pays*

— — — — Loi en cosécante $\theta$ pour 5 mm/h

Par comparaison avec les résultats présentés dans la Fig. 2, les longueurs de trajet équivalentes relevées par Yamaguchi sont beaucoup plus grandes pour les mêmes taux de précipitation. Lorsque le paramètre utilisé est le pourcentage du temps, même s'il correspond à différents taux de précipitation, les données de Tokyo et celles de Yamaguchi se reportent sur les mêmes courbes.

En outre, la correspondance entre les données relatives à l'Europe et l'Amérique du Nord, d'une part, et au Japon, d'autre part, est plus étroite lorsque les courbes correspondantes ont comme paramètre le pourcentage du temps, sauf pour des angles de site très petits.

En ce qui concerne les données d'affaiblissement recueillies en Australie tropicale, à 11 GHz et à des angles de site de 30° et 90°, la Fig. 1 surestime de 30% la longueur de trajet équivalente pour des taux de précipitation d'environ 25 mm/h; elle sous-estime de 30% la longueur de trajet équivalente pour des taux de précipitation d'environ 100 mm/h [Jenkinson, 1977].

Une méthode élaborée en U.R.S.S. permet de calculer l'affaiblissement sur un trajet oblique à tous les angles de site (soit de 0° à 90°); il y est tenu compte des conditions climatiques et de la non-uniformité spatiale des pluies dans cette région. Les valeurs ainsi calculées concordent avec les données expérimentales obtenues en U.R.S.S. à 12 GHz [Kalinin, 1974 et 1976]. A un angle de site de 10° et pour des taux de précipitation de 10 à 150 mm/h, les longueurs de trajet équivalentes fournies par cette méthode sont comprises entre 16 et 10,5 km.

Les données relatives à la longueur de trajet équivalente sont encore insuffisantes. Les courbes des Fig. 1 et 2 sont donc provisoires; en l'absence d'autres données, il faut les utiliser avec circonspection. Il est d'ailleurs évident que l'on a aussi un besoin urgent de telles données pour les autres climats.

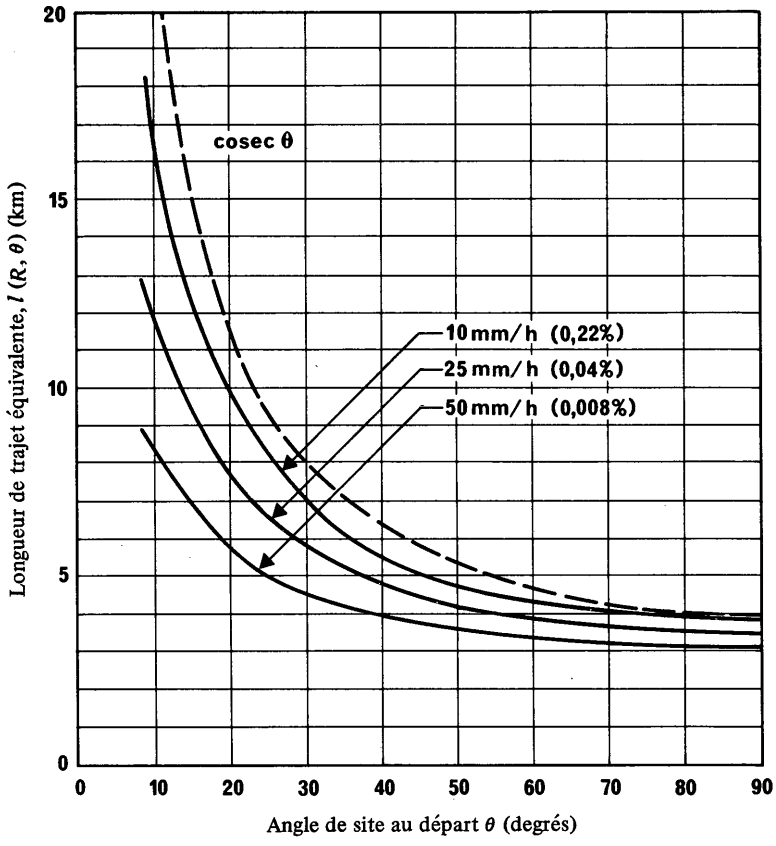



FIGURE 2 – *Longueurs de trajet équivalentes pour la zone de Tokyo*

———— Loi en cosécante $\theta$ pour 5 mm/h

## 7. **Résultats de mesures d'affaiblissement** (précipitations et nuages)

### 7.1 *Généralités*

L'évaluation de grands affaiblissements dépassés pendant de très petits pourcentages du temps nécessite la mesure d'événements rares, d'une durée de quelques minutes. Par exemple, 0,01% d'un mois (pourcentage utilisé dans l'étude des systèmes) correspond à une période de 4 minutes. Des événements aussi courts ont une périodicité de quelques années, et les données statistiques correspondantes varient considérablement d'une année à l'autre. Pour recueillir des données utiles aux fins de prévision, il faut donc étendre à plusieurs années la campagne de mesures.

Des mesures directes sur des émissions de satellite ont permis de recueillir récemment, dans plusieurs pays, des données intéressantes; on trouvera plus loin dans la présente section un résumé des résultats obtenus. Toutefois, ceux-ci ne s'étendent pas à des intervalles de variation suffisamment étendus en fréquence, en angle de site et en conditions climatiques. Il est donc nécessaire de compléter les données mesurées sur les émissions de satellites par des données mesurées par d'autres moyens: radiométrie solaire, radiométrie passive et techniques de radiodétection. On trouvera dans le Rapport 721 des observations sur ces différentes méthodes. Quelle que soit la méthode utilisée, il faut, pour en interpréter les résultats, tenir compte du fait que les très fortes pluies, celles qui causent l'affaiblissement le plus grand, sont relativement peu étendues dans le sens horizontal. Sauf dans les cas de transmissions quasi verticales ou de précipitations continues, la longueur équivalente sur laquelle se produit un affaiblissement important dépend donc de la dimension horizontale de la cellule de pluie. Ainsi, la variation de la distribution cumulative de l'affaiblissement en fonction de l'angle de site pour de très petits pourcentages du temps dépend de la probabilité d'apparition d'une cellule de pluie le long du trajet et des caractéristiques spatiales de cette cellule. Aux petits angles de site, la probabilité pour que le trajet de transmission traverse plus d'une cellule devient grande.

### 7.2 *Méthodes de mesure*

Ce sont les mesures sur des émissions de satellite qui constituent la méthode la plus directe. Parmi les méthodes radiométriques, la radiométrie solaire met en jeu des appareils à héliostat, qui ont une portée dynamique relativement étendue mais sont sujets à des erreurs dues à des effets horaires diurnes. La radiométrie passive, par

mesure du bruit d'émission, est commode et largement utilisée pour des affaiblissements d'au plus 10 dB, mais les erreurs dues à la diffusion peuvent devenir importantes à des fréquences de 30 GHz environ et au-dessus. Certains radars météorologiques équipés spécialement ont été utilisés, au Canada, pour prévoir des statistiques d'affaiblissement [Rogers, 1972; Inkster et Rogers, 1974] et, en Suisse, pour étudier l'influence du terrain sur la formation de zones de grande réflectivité et de grand affaiblissement [Debrunner et Liniger, 1975]. Cependant, les données recueillies par radiodétection sont jusqu'ici d'une exploitation assez limitée, et les résultats indiqués dans les sections qui suivent ont été obtenus par les autres méthodes susmentionnées. Seules, les méthodes qui offrent une fiabilité statistique réelle sont brièvement exposées dans le présent Rapport.

### 7.3 *Mesures directes au moyen d'un satellite*

Il est commode de passer en revue les résultats par ordre de fréquence croissante. (A noter cependant que certaines données récentes du satellite ATS-6 n'ont pas encore été analysées.)

L'UER a organisé une campagne de mesures au cours des émissions de télévision expérimentales relayées par ATS-6 à 860 MHz à destination de l'Inde. Des images ont été reçues dans de nombreuses partie de l'Europe occidentale, où les valeurs du champ étaient généralement conformes aux prévisions théoriques [Cheveau, 1977].

On a recueilli des données à 4 GHz à Yamaguchi (Japon), en observant la dégradation du rapport porteuse/bruit sur un circuit de radiocommunication par satellite en service [Yokoi et autres, 1974]. On a constaté, sur une période de 3 ans, que l'affaiblissement était de 0,5, 0,9 et 1,3 dB pendant respectivement 0,1%, 0,01% et 0,001% du temps, à un angle de site de 8°.

Certaines observations ont été faites au moyen du Satellite de technologie des communications (CTS) à 11,7 GHz et des données ont été obtenues aux Etats-Unis au moyen des satellites COMSTAR à 19 et 28,6 GHz, mais leur analyse statistique n'a pas encore été communiquée.

Des résultats particulièrement intéressants pour l'étude des systèmes ont été obtenus avec les diverses émissions des satellites ATS (ATS-5 et ATS-6). Ils sont résumés dans le Tableau III.

Toutes les expériences faites au moyen du satellite ATS-6 dans le nord-ouest de l'Europe entre août 1975 et août 1976 coïncidaient avec une période de sécheresse exceptionnelle. Certes, il y eut quelques orages, mais, pendant cette période, les hauteurs de précipitation (mm) ont été très au-dessous de la moyenne, aussi les données obtenues doivent-elles être utilisées avec prudence en attendant de nouveaux résultats. D'où l'intérêt des nombreuses données recueillies par d'autres méthodes.

Les données recueillies aux Etats-Unis dans les bandes de 13 à 18 GHz ont été résumées dans [Hyde, 1976].

### 7.4 *Mesures radiométriques*

#### 7.4.1 *Radiométrie passive*

On a largement utilisé cette méthode pour mesurer l'affaiblissement sous des climats et à des fréquences et des angles de site différents. Lorsqu'elle est appliquée sans correction de diffusion, la méthode sous-estime en général l'affaiblissement réel, en particulier aux fréquences supérieures. A 37 GHz, à des angles de site de 10° à 30° et dans un climat tempéré, l'erreur était d'environ 10 à 15% et 30 à 35% de la valeur numérique en décibels pour les polarisations respectivement verticale et horizontale. Cette méthode est intéressante à 30 GHz environ et au-dessous et pour des affaiblissements inférieurs à 10 dB, à condition de faire une correction approximative pour tenir compte de la diffusion. Sous ces réserves, la comparaison entre les méthodes radiométriques et celles par mesure sur des émissions de satellite a fait apparaître une concordance satisfaisante (voir le Rapport 721). L'Agence spatiale européenne a abondamment appliqué la méthode radiométrique pour recueillir des données à 12 GHz environ. On trouvera aux § 7.4.3 et 7.5 une récapitulation de toutes les données radiométriques.

#### 7.4.2 *Mesures au moyen de radiomètres à héliostat*

La radiométrie solaire a été utilisée elle aussi par plusieurs organismes, notamment aux Etats-Unis, au Royaume-Uni et au Japon. Les variations de l'angle de site et l'apparition possible d'effets diurnes rendent difficile la comparaison avec la méthode par mesure sur des émissions de satellite. On dispose néanmoins de nombreuses données utiles à des fréquences comprises entre 9 et 40 GHz et de données moins nombreuses jusqu'à 71 GHz.

#### 7.4.3 *Données mesurées*

Dans ce paragraphe, on présente un panorama des données qui ont été mesurées au moyen de radiomètres passifs et de radiomètres solaires et peuvent servir à l'étude des systèmes. Ici encore, les résultats sont examinés par ordre croissant de fréquence.

TABLEAU III – *Mesures de l'affaiblissement au moyen de satellites ATS*

| Satellite | Lieu des mesures | Angle de site | Affaiblissement dépassé pendant un pourcentage du temps donné % | | | Particularité et durée d'observation (h) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,01 | 0,1 | 1,0 | |
| ATS-5<br>15,3 GHz | Washington (D.C), Etats-Unis [Ippolito, 1971] | 38° | ≈ 18 dB (estimation) | 6 dB | 1,5 dB | Complété par des données radiométriques |
| ATS-6<br>20 GHz | Paris(1) | 26° | 9 dB | 4,5 dB | 2 dB | 1108 h. |
| ATS-6<br>20 GHz | Suffolk, Royaume-Uni(1) | 23° | 8 dB | 5 dB | 3 dB | 1028 h. |
| ATS-6<br>30 GHz | Suffolk, Royaume-Uni(1) | 23° | >30 dB | 11 dB | 5 dB | 1141 h. |
| ATS-6<br>30 GHz | Birmingham Royaume-Uni(1) | 21° | – | 13 dB | 6 dB | 861 h. |
| ATS-6<br>30 GHz | Zone de Slough(1) Royaume-Uni | 22° | 13 – 22 dB | 9 dB | 3 dB | 1742 h. +<br>9258 h. de données radiométriques |
| ATS-6<br>30 GHz | Eindhoven, Pays-Bas(1) | 25° | 13 dB | 11 dB | 7,5 dB | 750 h. |
| ATS-6<br><br>13 GHz<br>18 GHz | Massachusetts, Etats-Unis | 36° | | <br><br>4 dB<br>6 dB | <br><br>0,1 dB<br>2 dB | <br><br>4112 h.<br>2730 h. |
| ATS-6<br><br>13 GHz<br>18 GHz | Iles Wallops, Etats-Unis | 42° | | <br><br>5 dB<br>7,5 dB | <br><br>1 dB<br>2 dB | <br><br>4303 h.<br>3667 h. |
| ATS-6<br><br>13 GHz<br>18 GHz | Floride Etats-Unis | 56° | | <br><br>6 dB<br>16,5 dB | <br><br>1 dB<br>2 dB | <br><br>3374 h.<br>1461 h. |
| ATS-6<br>30 GHz | Leeheim, Allemagne (République fédérale d')(2) | 27° | | 10 dB | 2,5 dB | 1215 h. |

(1) Données extraites des Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), 1977.

(2) [Dintelmann et Rücker, 1977].

La Fig. 3 résume les résultats obtenus en divers emplacements dans la bande de fréquences de 9,4 à 19 GHz. Il convient de souligner que l'on constate, en un même emplacement, des variations considérables d'une année à l'autre. Dans de nombreux cas (par exemple, dans le nord-ouest de l'Europe), ces variations rendent très difficile la collecte de données fiables sur l'influence de l'angle de site. En Australie, au Royaume-Uni et ailleurs dans le nord-ouest de l'Europe, on n'a pas constaté de relation bien définie avec l'angle de site, même à 19 GHz. Sous d'autres climats, où les fortes pluies sont plus uniformes dans le sens horizontal, on peut représenter approximativement les variations par une loi en cosécante. La Fig. 3 illustre cette influence très nette des différences entre les zones hydrométéorologiques. Par exemple, les affaiblissements dépassés pendant 0,01% du temps dans les bandes des 11 et 12 GHz vont de quelque 3 dB pour la Colombie britannique à 20 dB environ en Malaisie.

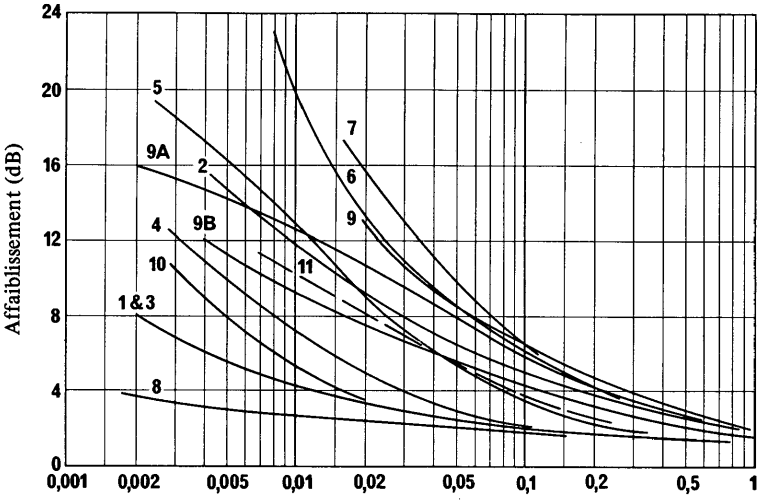



FIGURE 3 – *Mesures radiométriques de l'affaiblissement sur des liaisons Terre-espace*

$f = 9{,}4$ à 19 GHz

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Slough, Royaume-Uni | 12 | GHz | $\theta = 10°$ à $50°$ |
| 2 | Slough, Royaume-Uni | 19 | GHz | $\theta = 10°$ à $50°$ |
| 3 | Toyokawa, Japon | 9,4 | GHz | $\theta = 45°$ |
| 4 | Setagaya, Japon | 11,8 | GHz | $\theta = 45°$ |
| 5 | Mitaka, Japon | 17 | GHz | $\theta = 45°$ |
| 6 | Klang, Malaisie | 11,8 | GHz | $\theta = 45°$ |
| 7 | New Jersey, Etats-Unis | 16 | GHz | $\theta = 30°$ |
| 8 | Lake Cowichan, Canada | 13 | GHz | $\theta = 33°$ |
| 9 | Innisfail, Australie | 11 | GHz | $\theta = 30°$ |
| 9A | Innisfail, Australie | 11 | GHz | $\theta = 10°$ à $90°$ (moyenne diurne) |
| 9B | Innisfail, Australie | 11 | GHz | $\theta = 90°$ (de nuit) |
| 10 | Leeheim, Allemagne (Rép. féd. d') | 11 | GHz | $\theta = 27°$ |
| 11 | Maryland, Etats-Unis | 11,6 | GHz | $\theta = 45°$ |

Les données de la Fig. 3 concernent généralement l'affaiblissement supplémentaire par rapport à sa valeur correspondant à des conditions moyennes par temps clair (ce supplément étant d'au moins 0,2 dB environ à 15 GHz pour un angle de site de 30°). La Fig. 3 doit être considérée comme une information générale et il convient d'étudier les documents originaux pour y trouver des indications plus détaillées. Cette figure a été tracée sur la base du résumé établi par [Davies, 1973], complété avec les données fournies par [Kinase et Kimpara, 1969, 1973; Makino et autres, 1971; Davies, 1975; Turner, 1972; Wilson et Mammel, 1973; Jenkinson, 1975, 1977; Allnutt, 1976 et Dintelmann et Rücker, 1977].

La Fig. 4 résume des données radiométriques sur l'affaiblissement dans la bande de 20 à 40 GHz. Dans cette gamme de fréquences, l'effet de l'étendue horizontale des milieux pluviaux devient important et la relation avec l'angle de site est plus marquée. C'est pourquoi la Fig. 4 peut fournir certaines indications sur l'influence de l'angle de site, mais il s'agit seulement d'indications générales. Au demeurant, comme celles de la Fig. 3, ses données font apparaître une nette augmentation de l'affaiblissement avec la fréquence; on notera aussi les différences considérables qui existent entre les courbes tracées aux mêmes fréquences pour différents climats (par exemple, le Royaume-Uni et le Japon). En certains emplacements (à Hawaii, par exemple), on constate que les valeurs d'affaiblissement dépassent de beaucoup toutes celles des Fig. 3 et 4.

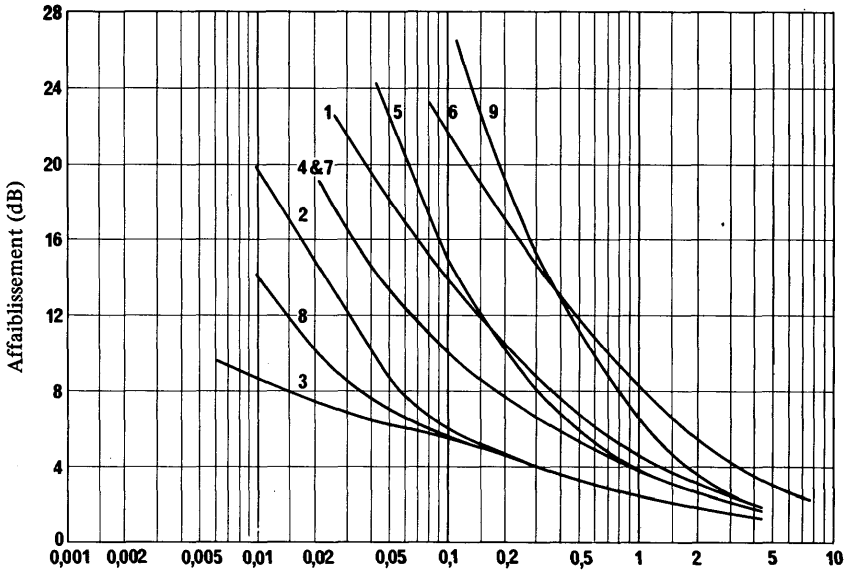



FIGURE 4 – *Mesures radiométriques de l'affaiblissement sur des liaisons Terre-espace*

$f$ = 20 à 37 GHz

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Slough, Royaume-Uni | 37 GHz $\theta = 5°$ à 15° |
| 2 | Slough, Royaume-Uni | 37 GHz $\theta = 45°$ à 55° |
| 3 | Martlesham, Royaume-Uni | 20 GHz $\theta = 23°$ |
| 4 | Martlesham, Royaume-Uni | 30 GHz $\theta = 23°$ |
| | Langley, " | 30 GHz $\theta = 22°$ |
| | Winkfield, " | 30 GHz $\theta = 23°$ |
| 5 | Tokyo, Japon | 23 GHz $\theta = 45°$ |
| 6 | Gotemba, Japon | 35 GHz $\theta = 45°$ |
| 7 | Mont Fuji, Japon | 35 GHz $\theta = 45°$ (altitude de l'emplacement, 3,8 km) |
| 8 | Paris, France | 20 GHz $\theta = 23°$ à 39° |
| 9 | New Jersey, Etats-Unis | 30 GHz $\theta = 5°$ à 70° (moyenne des données) |

Les données fournies par le Japon pour 35 GHz (courbes 6 et 7) (Fig. 4) ont été recueillies en deux emplacements présentant entre eux une dénivelée de 3 km (le mont Fuji et Gotemba); elles montrent que le pourcentage du temps pendant lequel une certaine valeur d'affaiblissement est dépassée est sept fois plus petit à l'emplacement de haute altitude [Otsu et autres, 1978]. D'autres résultats obtenus au Japon [Sato et autres, 1978] complètent l'information sur l'influence de l'angle de site. A 17 GHz, pendant 0,01% du temps, l'affaiblissement dépassait 19, 18, 9,5 et 16 dB, respectivement à des angles de site de 5°-15°, 15°-30°, 30°-60° et 60°-90°. A 27 GHz, pour le même pourcentage du temps, les valeurs étaient de 21 et 27 dB respectivement à des angles de site de 30°-60° et 60°-90°. Cette influence de l'angle de site va de pair avec les taux de précipitation observés pour les quatre intervalles angulaires, soit respectivement 28, 34, 26 et 63 mm/h.

## 7.5 *Données sur le mois le plus défavorable* *

L'étude d'un système nécessite parfois des données pour un «mois le plus défavorable». Il est regrettable que peu de recherches aient permis d'établir des statistiques suffisamment complètes sur l'affaiblissement pour qu'on en tire des données fiables sur le «mois le plus défavorable». En outre, même à une fréquence déterminée, les données dépendent beaucoup du climat, de l'angle de site et de l'importance relative des effets de la pluie et des scintillations ou encore d'une propagation par trajets multiples par temps clair.

La collection de données la plus complète sur les distributions pour le «mois le plus défavorable» est celle que l'Agence spatiale européenne a rassemblée au moyen de mesures faites pendant 3 ans environ à 10 emplacements en Europe, donnant un total de 31 distributions représentatives d'un mois le plus défavorable. Le Tableau IV indique la distribution pour le mois le plus défavorable d'une année civile en Europe occidentale à 11,4 GHz, l'angle de site étant compris entre 20° et 45° [Brussaard, 1977].

* Voir le Rapport 723.

TABLEAU IV – *Affaiblissement pour le mois le plus défavorable: Europe occidentale, à 11, 4 GHz, $\theta = 20° - 45°$*

| Pourcentage du temps du mois le plus défavorable (%) | 90 % des cas (dB) | 50 % des cas (dB) | 10 % des cas (dB) |
|---|---|---|---|
| 20 | 0,3 | 0,4 | 0,6 |
| 5 | 0,4 | 0,6 | 0,9 |
| 1 | 0,9 | 1,1 | 1,4 |
| 0,3 | 1,2 | 1,8 | 2,4 |
| 0,1 | 1,5 | 3,3 | 6,0 |
| 0,03 | 3,1 | 7,3 | 11,0 |

Si l'on compare ces résultats avec les valeurs à long terme relevées en Europe occidentale à 11-12 GHz, on constate que le pourcentage du temps pendant lequel une valeur donnée d'affaiblissement est dépassée au cours d'une année moyenne correspond approximativement au sixième du pourcentage du temps pendant lequel le même affaiblissement est dépassé pendant le mois le plus défavorable de l'année moyenne. Des résultats de l'Agence spatiale européenne il ressort en outre que les variations d'une année à l'autre de la distribution cumulative sont similaires aux variations en fonction de l'emplacement. Ils montrent aussi que le rapport du pourcentage du temps pendant le mois le plus défavorable au pourcentage du temps au cours de l'année varie entre 10 et 3 pour des niveaux d'évanouissement dépassés pendant moins de 1% du temps du mois le plus défavorable.

### 7.6 *Durée des évanouissements*

Des durées d'évanouissement ont été relevées au cours d'expériences faites au Royaume-Uni à 19 et 37 GHz au moyen de radiomètres solaires [Davies, 1973 et 1976]. Dans ces observations, de fortes pluies constituaient le facteur dominant. A 19 GHz, au cours de 50 mois d'observation, on a constaté qu'aucun évanouissement dépassant 10 dB ne durait plus de 8 minutes et que la durée maximale de tout évanouissement dépassant 5 dB était de 38 minutes. A 37 GHz, au cours de 23 mois d'observation, on a enregistré un seul évanouissement de plus de 10 dB qui ait duré plus de 27 minutes et, pour les évanouissements dépassant 5 dB, six seulement qui aient une durée de plus de 50 minutes.

La durée des évanouissements a été mesurée aussi au cours des expériences de l'Agence spatiale européenne; le Tableau V indique les données recueillies pendant toute l'année 1975.

### 7.7 *Mesures à des fréquences supérieures à 40 GHz*

Au-dessus de 40 GHz, on a fait peu d'expériences qui soient suffisamment étendues pour pouvoir servir de base à une évaluation quantitative des caractéristiques de fonctionnement de systèmes. Néanmoins, quelques résultats provisoires intéressants ont été obtenus.

[Davies, 1975] a résumé les données recueillies à Slough (Royaume-Uni) au moyen d'un radiomètre solaire à commutation de faisceau accordé sur 71 GHz. A tous les angles de site possibles (de 0° à 62°), l'affaiblissement supplémentaire dû aux nuages et à la pluie (par rapport à sa valeur par temps clair), qui avait été dépassé pendant 3, 1 et 0,5% du temps durant 2081 heures d'observation sur une période de six mois, était respectivement de 4,5, 9,5 et 12 dB environ. La plupart des évanouissements profonds (plus de 15 dB) n'ont pas duré plus de 8 à 10 minutes, mais quatre des évanouissements de plus de 15 dB avaient une durée comprise entre 40 et 140 minutes.

[Gibbins, 1974] a décrit certains résultats de mesures faites à Slough (Royaume-Uni) sous incidence verticale, à 110 GHz. Les valeurs de l'affaiblissement total (dû aux gaz atmosphériques, aux nuages et aux précipitations) ont été calculées à partir de données sur le bruit d'émission, corrigées estimativement pour tenir compte des effets de diffusion dans la pluie. L'affaiblissement ainsi calculé dépassait environ 6, 10 et 13 dB pendant respectivement 5, 1 et 0,5% du temps.

Lorsque la fréquence dépasse 40 GHz, l'effet des nuages devient de plus en plus important (voir le Rapport 721). Cependant, des mesures récentes citées dans ce dernier Rapport montrent que, dans certains types de nuage (par exemple, des strato-cumulus), l'affaiblissement supplémentaire sous incidence verticale a son maximum compris entre 0,5 et 1 dB, même à 150 GHz. En revanche, des nuages ayant une forte teneur en eau liquide, tels que les cumulo-nimbus, peuvent causer un affaiblissement supplémentaire de 4 à 5 dB environ à 100 GHz et même de 8 dB à 150 GHz.

TABLEAU V – *Durée des évanouissements à 11,4 GHz (données radiométriques de l'Agence spatiale européenne)*

| Durée des évanouissements | Nombre d'évanouissements | | Fraction du temps d'évanouissement | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 dB | 3 dB | 1 dB | 3 dB |
| ⩽ 30 s | 66 | 18 | 0,6 % | 1,4 % |
| ⩽ 1 mn | 147 | 32 | 2 % | 3,5 % |
| ⩽ 2 mn | 210 | 50 | 4,5 % | 11 % |
| ⩽ 5 mn | 297 | 66 | 11,5 % | 25,5 % |
| Tous les évanouissements | 453 | 93 | 100 % | 100 % |

## 8. Diversité d'emplacement

### 8.1 *Généralités*

Comme les cellules de pluie intense, qui causent un affaiblissement important sur une liaison Terre-espace, ont souvent des dimensions horizontales limitées à quelques kilomètres, la commutation entre deux ou plusieurs stations terriennes (diversité d'emplacement) peut améliorer considérablement la fiabilité d'un système. Pour évaluer cette amélioration, il faut connaître la distribution cumulative des probabilités combinées de l'affaiblissement dû à la pluie, en fonction de l'espacement entre les emplacements. Les angles que fait la droite joignant les emplacements avec la direction d'observation et la direction dominante du déplacement des cellules de pluie jouent aussi un rôle important. (La diversité d'emplacement peut encore servir à diminuer les évanouissements dus à des scintillations; voir le § 4.2.)

### 8.2 *Mesures relatives à la diversité d'emplacement*

Toutes les méthodes énumérées au § 7.2 ont permis d'obtenir certains résultats concernant la diversité d'emplacement, mais, comme dans le cas d'un emplacement unique, nombre des études effectuées n'avaient pas une durée suffisante pour garantir une bonne fiabilité statistique. Quelques résultats fructueux ont néanmoins été obtenus, notamment au moyen du satellite ATS-6; on trouvera dans le présent paragraphe un résumé des conclusions les plus importantes et un essai de généralisation de ces conclusions, en vue de normaliser une méthode de traitement. Comme pour les données relatives à un emplacement unique, les résultats sont présentés par ordre de fréquence croissante.

Des résultats ont été publiés pour Slough (Royaume-Uni) à 11,6 GHz [Allnutt, 1976, 1977]. Six radiomètres pointés à un angle de site de 29,5° ont permis de mesurer le bruit d'émission sur une période de deux ans. L'espacement entre les emplacements de chaque paire allait de 0,4 à 23,6 km. On a constaté que la direction optimale de la droite joignant deux emplacements était perpendiculaire à la direction d'observation, mais aussi que l'amélioration procurée par la diversité n'augmentait pas sensiblement au-delà d'un espacement de 7 km.

On a recueilli dans le New Jersey (Etats-Unis) des données radiométriques à 16 GHz sur une période d'un an [Wilson et Mammel, 1973]. Les emplacements étaient espacés de 11, 19 et 30 km et les radiomètres pointés à un angle de site de 32° et à un azimut perpendiculaire à la droite joignant deux emplacements. Les pourcentages du temps pendant lesquels un affaiblissement de 10 dB était dépassé simultanément aux deux emplacements étaient de 0,004 et 0,003%, respectivement pour les espacements de 11 et 19 km. Dans le cas d'un emplacement unique, le pourcentage du temps correspondant était de 0,05% environ (voir la Fig. 3), soit des facteurs respectivement de 12 et 17 pour les deux espacements précités à l'«avantage de la diversité». Au niveau de 6 dB, ces facteurs étaient de 10, 13 et 25 pour les espacements respectivement de 11, 19 et 30 km (voir le § 8.3 et la Fig. 5). D'autres données pertinentes concernant le New Jersey ont été analysées [Hogg et Chu, 1975].

Au Japon, de même, on a obtenu des résultats par radiométrie solaire ou par la mesure du bruit d'émission. Les fréquences utilisées étaient de 17, 18 et 35 GHz, et les données citées se rapportent à un angle de 45° [Funakawa et Otsu, 1974; Morita et Higuti, 1978]. Les espacements variaient de 2,6 à 33 km. On a établi une relation entre ces données et les valeurs observées du taux de précipitation.

Récemment, on a établi aussi une relation entre les probabilités cumulatives d'affaiblissement pour des emplacements uniques et la probabilité combinée pour des paires d'emplacements, avec des espacements de 5 à 50 km (voir le § 8.3).

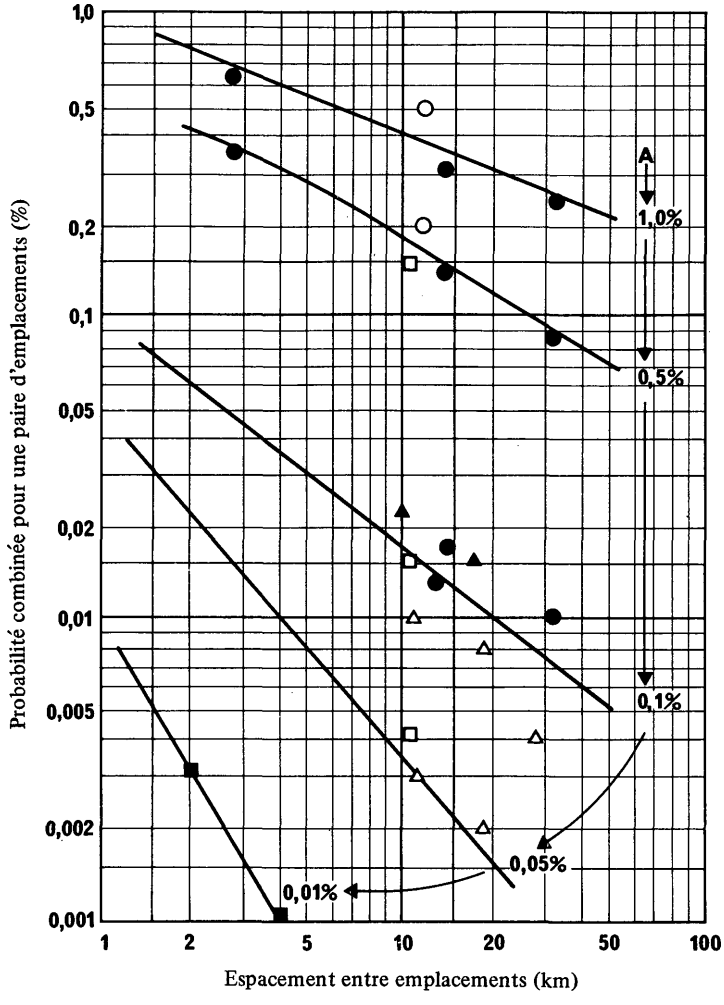



FIGURE 5 – *Probabilité pour que l'affaiblissement soit dépassé simultanément aux deux emplacements de réception en diversité d'espace en fonction de leur espacement*

On a recueilli des données dans la bande de fréquences de 30 à 37 GHz à Slough (Royaume-Uni), tout d'abord au moyen de radiomètres solaires accordés sur 37 GHz [Davies, 1976]. Récemment, des mesures ont été faites à 30 GHz [voir les Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), 1977], au moyen du satellite ATS-6, ainsi que des mesures du bruit d'émission, dans les deux cas à un angle de site de 23°. Les données à 30 GHz portent sur une période d'un an, avec des espacements de 2, 10,3 et 12,3 km entre emplacements, les droites de jonction étant sensiblement perpendiculaires à la direction d'observation. Pour des affaiblissements de 5 et 10 dB (dépassés pendant 0,5 et 0,1% du temps en un emplacement unique), on obtenait avec un espacement de 12,3 km des facteurs respectivement de 2,5 et 10 environ à l'avantage de la diversité.

On trouvera au § 4.2 du Rapport 563-1 d'autres données sur la réception en diversité d'espace; ces données proviennent d'observations de la structure des cellules de pluie faites par radiodétection au Canada et aux Etats-Unis.

## 8.3 *Généralisation des données de diversité*

Pour faciliter la mise au point de méthodes de prévision, il est souhaitable de généraliser les résultats des recherches de différents auteurs sur la diversité en les composant sous une forme résumée [Morita et Higuti, 1978]. C'est ce que l'on a tenté de faire dans la Fig. 5, qui est fondée en partie sur des travaux récemment effectués au Japon, mais qu'on a modifiée et étendue pour tenir compte d'autres données. Cette figure montre que la

probabilité pour qu'un affaiblissement soit dépassé simultanément à deux emplacements dépend de l'espacement entre ceux-ci. Associée aux Fig. 3 et 4, la Fig. 5 résume les données statistiques disponibles sur la diversité d'emplacement. Par exemple, à une fréquence de 16 GHz, les données du New Jersey (Fig. 3) montrent que la valeur de 10 dB est dépassée pendant 0,05% environ du temps à un emplacement unique. Comme la Fig. 5, de son côté, montre qu'à des emplacements espacés de 11 km le pourcentage du temps correspondant tombe à 0,003% environ, on en déduit que le facteur représentant l'avantage de la diversité est ici de 17 environ.

On se reportera aux articles pertinents pour avoir des renseignements détaillés sur les emplacements, les angles de site, etc., mais on peut considérer que la Fig. 5 offre une image composite concordant bien avec les données mesurées dans la bande de 11 à 40 GHz, à des angles de site compris le plus souvent entre 10° et 50°.

La pente des courbes tracées sur la Fig. 5 est d'autant plus forte que les pourcentages du temps sont plus petits. Il y a donc concordance avec les données météorologiques, d'après lesquelles les dimensions horizontales des cellules de pluie associées à de grands affaiblissements tendent à décroître quand le taux de précipitation maximal de la cellule augmente. Cependant, il convient de souligner que ces courbes composites ont été établies sur la base de données provisoires et doivent être utilisées avec prudence, car aux fréquences élevées, en particulier, les avantages de la diversité d'emplacement peuvent être très faibles si les deux emplacements choisis ont une grande probabilité de recevoir simultanément de fortes pluies (par exemple, si la droite qui les joint est parallèle aux fronts pluviaux dominants).

La topographie peut aussi être un facteur important. Par exemple, des expériences faites au Canada montrent qu'à une paire d'emplacements, située dans l'Ontario, la qualité de la réception en diversité est régulièrement médiocre, tandis qu'elle est bonne à une paire d'emplacements orientée de la même manière mais située dans le Québec.

## 9. Température de bruit

Le Rapport 720 étudie la relation qui existe entre l'absorption atmosphérique et le bruit d'émission que peuvent détecter des récepteurs sensibles. A mesure que l'absorption augmente, le bruit d'émission augmente lui aussi; pour un milieu très absorbant, ce bruit devient assimilable à celui qu'émettrait un radiateur parfait (corps noir) à la température cinétique effective du milieu, qui est généralement de l'ordre de 280 K. On en trouve l'illustration dans les courbes correspondant à différents modèles d'atmosphère dans le Rapport 720. En revanche, si les variations de l'absorption atmosphérique sont connues pour un emplacement, une fréquence et un angle de site donnés, on peut évaluer les variations du bruit d'émission.

Quelques expériences ont été faites en vue de recueillir directement des données statistiques sur le bruit d'émission. Par exemple, les valeurs de [Turner et autres, 1970] montrent qu'au Royaume-Uni les températures de bruit du ciel dépassées pendant 0,01% du temps à un angle de site de 20° étaient de 148 K et 223 K aux fréquences respectives de 12 et 17 GHz. A un angle de site de 5°, les valeurs correspondantes étaient respectivement de 260 K et 274 K. Au Massachusetts, à 15 GHz, des valeurs de 10, 20, 55 et 100 K étaient dépassées pendant 10% du temps à des angles de site respectifs de 90, 30, 10 et 5° [Wulfsberg, 1964]. A des fréquences plus élevées, on enregistre un fort bruit d'émission pendant des pourcentages du temps appréciables. Par exemple, à 110 GHz dans le sud-est de l'Angleterre, des expériences sous incidence verticale montrent que des températures de bruit de 160 K et 230 K étaient dépassées pendant respectivement 10% et 1% du temps.

## 10. Brouillages

### 10.1 *Brouillage entre stations terriennes et stations de Terre*

Ce cas, dans lequel le trajet de brouillage se trouve dans sa totalité au voisinage de la surface de la Terre, est étudié dans le Rapport 569-1.

### 10.2 *Brouillage causé aux stations spatiales et par ces dernières*

Dans ce cas, le trajet de brouillage est un trajet Terre-espace, qui traverse par conséquent toutes les couches de l'atmosphère entre la station spatiale et le sol. Il s'agit, par exemple, du brouillage entre une station spatiale et une station terrienne, ou entre une station spatiale appartenant à un système à satellites et une station de Terre appartenant à un autre système; le cas est examiné dans le Rapport 569-1.

Pour calculer l'affaiblissement de transmission sur le trajet de brouillage, il faut tenir compte de l'affaiblissement en espace libre, la directivité des antennes et l'affaiblissement supplémentaire dû à l'oxygène et la vapeur d'eau.

Pratiquement, on peut admettre que l'affaiblissement dû à l'oxygène est indépendant de l'heure et du climat. En revanche, la teneur en vapeur d'eau est variable: sous la plupart des climats, pendant le mois le moins humide de l'année, sa valeur à la surface de la Terre est inférieure à 2 $g/m^3$ environ pendant 20% du temps et est négligeable pendant 0,01% du temps [Bean et Dutton, 1966].

La Fig. 6 indique les valeurs au-dessous desquelles on peut prévoir que l'affaiblissement dû à l'oxygène et à la vapeur d'eau tombera pendant 20% et pendant 0,01% du temps du mois le moins humide aux fréquences de 4, 11, 18 et 30 GHz; on l'a établie en tenant compte des effets de la défocalisation du faisceau. En ce qui concerne les courbes pour 0,01% du temps, on les a établies sans tenir compte des effets de la scintillation (voir le Rapport 569-1, § 6.2); elles ne devraient pas être utilisées pour des fréquences inférieures à 20 GHz s'il s'agit d'angles de site plus petits que 5° environ.

Pour ce calcul, l'affaiblissement du signal dû à la défocalisation correspond à un climat continental polaire et est de 1 dB à un angle de site nul; il diminue lorsque l'angle de site augmente.

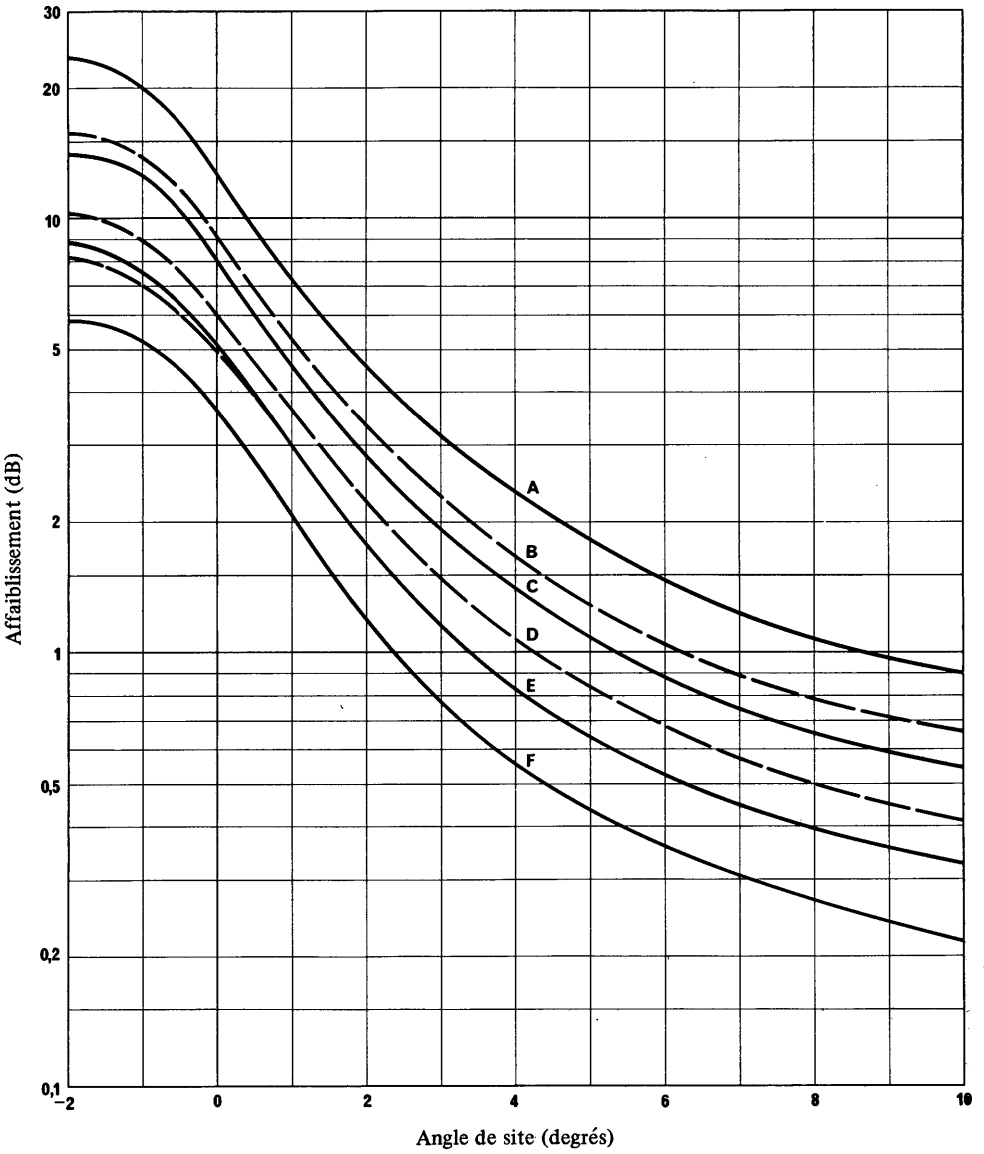



FIGURE 6 – *Valeur de l'affaiblissement total dû à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau, y compris les effets de défocalisation, non dépassée pendant 20% (courbes en trait plein) et pendant 0,01% (courbes en tirets) du mois le moins humide*

A: 30 GHz (20%)
B: 30 GHz (0,01%)
C: 18 GHz (20%)
D: 18 GHz (0,01%)
E: 11 GHz (20%; partie en tirets: 0,01%)
F: 4 GHz (20% et 0,01%)

10.3 *Protection de l'orbite des satellites géostationnaires*

Les effets de la réfraction sur la protection de l'orbite des satellites géostationnaires sont étudiés dans le Rapport 393-3.

## 11. Limitations imposées à la largeur de la bande de fréquences utilisée dans les systèmes de télécommunication spatiale

Au voisinage des raies d'absorption dues aux gaz atmosphériques, la dispersion est anormale et entraîne de petites variations de l'indice de réfraction. Cependant, dans les bandes attribuées pour les communications Terre-espace, ces variations sont minimes et ne limitent pas la largeur de bande des systèmes.

La diffusion multiple qui se produit dans un milieu pluvial peut limiter la largeur de bande des systèmes de transmission non cohérents, du fait des variations du temps de propagation des signaux affectés par une diffusion multiple, mais il a été avancé [Crane, 1971] que, dans ce cas, l'affaiblissement lui-même pose un problème beaucoup plus grave. Dans les systèmes de transmission cohérents, les limitations imposées à la largeur de bande du fait que l'affaiblissement dépend de la fréquence et que la pluie cause un déphasage dépassent 3,5 GHz dans toutes les conditions qui ont des chances de se rencontrer [Crane, 1967]. Ces largeurs de bande sont plus grandes que toutes celles qui ont été attribuées pour les communications Terre-espace au-dessous de 40 GHz, aussi l'affaiblissement dû à la pluie a-t-il beaucoup plus d'importance que le fait qu'il dépend de la fréquence.

Toutefois, de nouvelles études théoriques et expérimentales sont nécessaires pour déterminer l'influence de la fréquence sur la fonction de transfert atmosphérique (amplitude et phase) en tenant compte des effets produits par les gouttes de pluie non sphériques tombant obliquement. Cette fonction de transfert, associée à la fiabilité, c'est-à-dire au taux d'erreur sur les bits, peut servir à fixer les limitations à la largeur de bande, tant par beau temps qu'en présence d'hydrométéores.

## 12. Effets de la transpolarisation

12.1 *Généralités*

Pour augmenter la capacité des systèmes de télécommunication spatiale, on envisage de réutiliser les fréquences en recourant à des polarisations orthogonales. Cette méthode est cependant limitée par la dégradation causée à la polarisation par une propagation dans l'atmosphère et, dans une mesure moindre, par les antennes équipant ces systèmes. On trouvera dans le Rapport 555-1 une analyse du rapport d'isolation de différentes antennes équipant les systèmes de télécommunication spatiale. Le Rapport 722 donne une description plus complète des différents mécanismes de dégradation de la polarisation, notamment les effets de la réfraction, qui sont importants sur les liaisons de Terre et les liaisons Terre-espace.

12.2 *Mesures*

Jusqu'à une date récente, on disposait de très peu de mesures fiables des effets de la dégradation de la polarisation sur les trajets Terre-espace. Certaines des premières observations effectuées ont été décrites par [Taur, 1975]; on a tenté aussi de simuler des trajets obliques en utilisant des liaisons entre deux emplacements d'altitudes très différentes [Zufferey, 1976; Bartholomé, 1977]. Ces expériences de simulation ont apporté des renseignements utiles sur la dégradation causée à la polarisation par la pluie aux basses altitudes, mais les stations terminales les plus hautes ne l'étaient pas encore assez pour fournir des renseignements sur la dégradation causée à la polarisation par les hydrométéores de haute altitude. C'est pourquoi les mesures directes effectuées récemment au moyen de satellites revêtent une importance particulière; il faut souligner cependant que la durée de la plupart des expériences est inférieure à celle qui est jugée nécessaire pour évaluer la qualité du fonctionnement des systèmes pendant de très petits pourcentages du temps (0,01%, par exemple). Les résultats obtenus doivent donc être interprétés avec une grande prudence.

Il est commode de résumer les résultats par ordre croissant des fréquences utilisées avec les différents satellites en service. A 4 GHz, des ondes à polarisation circulaire émises par INTELSAT IV ont été reçues à Yamaguchi Japon, zone hydrométéorologique N° 2 * et à Taipei Chine, zone hydrométéorologique N° 1 *. Dans l'expérience de Yamaguchi [Yamada et autres, 1977], les mesures ont été faites entre août 1975 et octobre 1976 à un angle de site de 9° environ. Les rapports de découplage (XPD) étaient de 15,2, 12,7, 10,7 et 9,8 dB pendant des pourcentages du temps respectivement de 0,1, 0,03, 0,01 et 0,005%. La corrélation entre le rapport de découplage et l'affaiblissement du signal copolaire (CPA) était significative pour de fortes pluies mais moins nette pour une pluie légère correspondant à des affaiblissements inférieurs à 4 dB environ. Au cours des expériences faites à Taipei (d'août 1975 à juillet 1976) à un angle de site de 20° environ [Taur, 1977], on a obtenu pour le rapport de découplage des valeurs de 27, 24 et 22 dB pendant respectivement 0,1, 0,03 et 0,01% du temps. Ces résultats semblaient meilleurs que ceux prévisibles avec des estimations théoriques faites sur la base de données radiométriques et de données sur les taux de précipitation ponctuels relevés en ce même emplacement.

---

* Voir le Rapport 563-1 pour les zones hydrométéorologiques.

On a effectué plusieurs expériences au moyen de la balise à polarisation circulaire (11,7 GHz) du Satellite de technologie des communications (CTS). Des résultats de mesure obtenus à Ottawa (Canada) en juillet et août 1976 [Nowland et autres, 1977b] à un angle de site de 24,6°, il ressort que le rapport de découplage variait entre 40 et 15 dB. Les valeurs les plus petites de ce rapport correspondaient à des affaiblissements de plus de 3 dB et, dans cette gamme de valeurs, il existait une relation très nette entre le rapport de découplage et l'affaiblissement du signal copolaire. Les valeurs les plus petites du rapport de découplage pour des affaiblissements inférieurs à 3 dB ne pouvaient pas s'expliquer par la théorie de la dégradation de la polarisation par la pluie, de sorte que l'on peut conclure qu'elles étaient dues à une dégradation de la polarisation supplémentaire par des nuages de glace ou la couche de fusion. Les données se rapportant à deux tempêtes de pluie en Virginie (Etats-Unis) [Bostian et autres, 1977] montrent une corrélation étroite entre le rapport de découplage et l'affaiblissement du signal copolaire, sans qu'il y ait eu apparemment dégradation de la polarisation par d'autres hydrométéores. Des mesures faites dans le New Jersey (Etats-Unis) entre avril et septembre 1976 [Rustako, 1976] à un angle de site de 27° font apparaître une corrélation également étroite dans la plupart des cas. C'est ainsi qu'on a observé des fluctuations du rapport de découplage, avec un minimum d'environ 16 dB, pour des affaiblissements inférieurs à 1 dB.

On a fait aussi différentes expériences en Amérique du Nord au moyen des satellites COMSTAR, dont les balises ont des antennes à polarisation rectiligne fonctionnant sur 19 et 28 GHz. Des mesures faites à 19 GHz et à un angle de site de 18,5°, dans le New Jersey [Cox et autres, 1977a], font apparaître une forte dégradation de la polarisation pendant des durées pouvant atteindre une heure (rapport de découplage pouvant s'abaisser au-dessous de 20 dB) avec un affaiblissement du signal copolaire inférieur à 1 dB. Ces événements coïncidaient généralement avec des événements observés au moyen d'émissions à polarisation circulaire à 11,7 GHz du Satellite de technologie des communications (CTS) [Cox et autres, 1977b]. Deux explications plausibles ont été avancées. L'une fait intervenir des déphasages différentiels dus à la présence de nuages de glace au-dessus de la couche de fusion. L'autre met en jeu une dégradation éventuelle de la polarisation par de forts gradients du coïndice de réfraction, notamment à la base de formations orageuses.

En Europe occidentale, plusieurs équipes ont de même procédé à des mesures au moyen des émissions à polarisation rectiligne du satellite ATS-6 à 20 et 30 GHz et à des angles de site compris entre 20° et 25° environ [Shutie et autres, 1977a, b; McEwan et autres, 1977; Fimbel et Ramat, 1977; Howell et Thirlwell, 1977; Watson et autres, 1977a; Pratt et Browning, 1977; Thompson et autres, 1977]. En général, comme les durées totales d'observation ne dépassaient pas 1100 à 1500 heures, ces données sont à utiliser avec prudence. La valeur typique du rapport de découplage qui n'est pas dépassée pendant 0,01% du temps, à 20 et 30 GHz est de 20 dB environ. Comme dans les observations faites au moyen des balises COMSTAR, beaucoup de ces résultats manifestent une corrélation médiocre entre le rapport de découplage et l'affaiblissement du signal copolaire, aussi bien statistiquement que dans des cas isolés. Plusieurs auteurs attribuent ce fait à l'influence de nuages de glace situés à l'altitude de la couche de fusion et au-dessus. Cela est corroboré par des mesures effectuées par radiodétection simultanément avec les mesures directes sur les émissions [Shutie et autres, 1977a, b; McEwan et autres, 1977; Watson et autres, 1977]. On a observé que certaines diminutions soudaines du rapport de découplage coïncidaient avec des décharges atmosphériques [Watson et autres, 1977; Howell, 1977], ce qui laisse supposer une modification dans la distribution de l'orientation des cristaux de glace (qui s'alignent). Cette hypothèse, elle aussi, est corroborée par des mesures de la dégradation de la polarisation par les nuages de glace (mesures faites par radiodétection en diversité de polarisation) [Hendry et McCormick, 1976; McCormick et Hendry, 1977].

Des mesures faites au Royaume-Uni [Howell, 1977] et en France [Fimbel et Ramat, 1977] ont montré que, d'une manière générale, la relation de phase entre les signaux copolaire et contrapolaire est passablement constante (± 20°); dans certaines conditions, cependant, des changements brusques (~ 180°) peuvent se produire. Ces mesures sont particulièrement importantes pour l'évaluation de la faisabilité de dispositifs adaptatifs d'annulation du signal contrapolaire [Fimbel et Ramat, 1977].

[Taur et Mass, 1976] ont mesuré les caractéristiques spectrales de la dégradation de la polarisation par la pluie, pour des cellules de pluie largement espacées donnant lieu à des minimums nettement différents pour le rapport de découplage. Il en résulte que le domaine de variation de la dégradation de la polarisation due à la pluie décroît approximativement de 20 dB par écart de fréquence dans le rapport 10, de 0,1 à 0,7 Hz environ à 4 à 8 Hz environ.

Ayant mesuré au Japon la durée de la diminution du rapport de découplage causée par la pluie [Yamada et autres, 1977], on a constaté que cette durée suit une distribution log-normale.

### 12.3 *Conséquences pratiques*

Sur la base de ces diverses mesures, on peut formuler certaines conclusions provisoires:

*a)* il y a des cas où la dégradation de la polarisation est liée à l'affaiblissement dû à la pluie, mais, dans d'autres, elle ne correspond pas à un affaiblissement sensible et a été attribuée à la présence de nuages de glace le long du trajet;

*b)* la contribution des nuages de glace à la dégradation de la polarisation semble augmenter quand la fréquence s'élève. Cependant, les résultats obtenus donnent à penser que, à des fréquences allant jusqu'à 14 GHz environ, le rapport de découplage dépendrait principalement de la pluie. Aux fréquences plus élevées, il paraît vraisemblable que les nuages de glace ont une influence comparable ou même plus grande;

*c)* dans les conditions où la dégradation de la polarisation est surtout due à la pluie, il existe une corrélation marquée entre le rapport de découplage et l'affaiblissement du signal copolaire. Comme on le verra dans le paragraphe ci-après, on peut utiliser cette corrélation lors de l'étude des systèmes si l'on dispose de données statistiques sur l'affaiblissement dû à la pluie.

12.4 *Méthodes de prévision de la dégradation de la polarisation due à la pluie*

Comme les variables qui influent sur le phénomène de la dégradation de la polarisation sont très nombreuses, il a été difficile d'en présenter les calculs prévisionnels théoriques sous une forme qui soit utilisable par les ingénieurs concepteurs des systèmes; c'est cependant ce qui a été fait pour des méthodes simples de prévision statistique de la dégradation de la polarisation due à la pluie sur les trajets Terre-espace, à partir de données statistiques sur les affaiblissements ou les taux de précipitation [CCIR, 1974-78c]. Ces méthodes reposent sur des approximations serrées de la théorie générale, pour un milieu pluvial dont les gouttes ont une orientation aléatoire [Brussaard, 1976; Oguchi, 1977]. S'agissant d'établir des prévisions sur la base de données statistiques sur l'affaiblissement dû à la pluie, on a démontré que, pour des polarisations tant rectilignes que circulaires, la relation entre le rapport de découplage (XPD) et l'affaiblissement du signal copolaire (CPA) est de la forme [Nowland et autres, 1977]:

$$\mathrm{XPD} = U - V \log (\mathrm{CPA})$$

où $U$ et $V$ sont des fonctions de la fréquence, de l'angle d'inclinaison du plan de polarisation, de l'angle de site, de la distribution de l'angle de chute des gouttes de pluie et, à un bien moindre degré, de la distribution de la taille des gouttes de pluie.

Pour le cas d'une propagation sur un trajet oblique, en polarisation circulaire ou rectiligne inclinée, les approximations ci-après de $U$ et $V$ semblent concorder assez bien avec la théorie et les données disponibles:

$U = 30 \log (f) - 40 \log (\cos \varepsilon) - 20 \log (\sin 2\tau)$

$V = 20$

où $f$: fréquence (GHz)

$\varepsilon$: angle de site

$\tau$: angle d'inclinaison du plan de polarisation par rapport au plan horizontal.

En polarisation circulaire, comme on doit prendre $\tau$ égal à 45°, le terme comprenant cette variable disparaît de la formule.

Cette approximation est subordonnée aux conditions suivantes:

$1 \text{ dB} \leqslant \mathrm{CPA} \leqslant 15 \text{ dB}$ (CPA: rapport de découplage)

$10 \text{ dB} \leqslant \mathrm{XPD} \leqslant 40 \text{ dB}$ (XPD: affaiblissement du signal copolaire)

$8 \text{ GHz} \leqslant f \leqslant 40 \text{ GHz}$

$10° \leqslant \tau \leqslant 80°$

$10° \leqslant \varepsilon \leqslant 60°$

Il s'agit là toutefois d'une estimation provisoire, à utiliser avec prudence. Les données expérimentales sont encore rares; il est urgent d'enrichir l'information disponible.

En polarisation rectiligne quasi-horizontale ou verticale et pour des trajets terrestres, il convient de se référer au Rapport 722, où ce sujet est traité de manière plus détaillée.

Dans la bande de fréquences de 4 à 6 GHz, comme l'affaiblissement est très petit, il ne constitue pas un paramètre aussi utile pour prévoir le rapport de découplage. C'est pourquoi, aux fréquences inférieures à 8 GHz, le rapport de découplage est à exprimer en fonction du taux de précipitation et de la longueur de trajet [Oguchi, 1977; Yamada et autres, 1977].

Pour des liaisons Terre-espace sur lesquelles les antennes n'ont pas un bon rapport d'isolation, ces méthodes de prévision ne sont applicables que pour des taux de précipitation ou des affaiblissements suffisamment grands. Cela ne constitue cependant pas une difficulté pour les petits pourcentages du temps auxquels on s'intéresse le plus souvent. Pour des calculs précis avec de petits taux de précipitation ou pour des systèmes dans lesquels les antennes ont un rapport d'isolation médiocre ou un défaut d'alignement, il convient d'utiliser des méthodes fondées sur la théorie plus générale de la propagation entre antennes imparfaites [Shkarofsky et Moody, 1976; Shkarofsky, 1977].

## 13. Temps de propagation sur les trajets Terre-espace

13.1 *Généralités*

On dispose de plusieurs méthodes pour évaluer l'erreur moyenne commise sur le temps de propagation (ou la distance) quand une onde se propage à travers la troposphère sur un trajet Terre-espace. Toutefois, pour mesurer la distance d'un satellite et synchroniser les signaux dans le cas des systèmes numériques de télécommunication par satellite, il est nécessaire de connaître aussi la variance du temps de propagation. A des fréquences supérieures à 18 GHz, les temps de propagation dans l'ionosphère sont négligeables par rapport aux temps de propagation dans la troposphère. Comme le font observer les Rapports 718 et 721, le changement d'état de l'atmosphère entre un temps clair et la présence de précipitations peut influencer le temps de propagation et ses variations.

13.2 *Temps de propagation à travers une atmosphère sans précipitation*

Le temps de propagation moyen et sa variance dans une atmosphère sans précipitation peuvent se calculer avec la relation de régression entre le coïndice de réfraction à la surface de la Terre, $N_s$ et l'erreur sur la distance, $\Delta R$ (ou l'erreur correspondante sur le temps de propagation, $\Delta\tau$), relation qui a été établie aux Etats-Unis [Bean et Dutton, 1966]. Des précisions sur les méthodes, notamment les méthodes pour estimer la variance de l'erreur sur le temps de propagation, se trouvent dans un autre document [Nuspl et autres, 1975]. La plupart des statistiques relatives à $N_s$ sont publiées mensuellement, mais on peut estimer l'écart type $\sigma_{\Delta\tau}(T)$ sur une période quelconque $T$ en combinant ses estimations mensuelles avec la fonction spectrale semi-empirique du temps de propagation $\Delta\tau$.

Des courbes de $\sigma_{\Delta\tau}$ sur un trajet aller-retour espace-Terre sont tracées sur la Fig. 7 en fonction de la «fréquence de coupure» $f_c = 1/T$ et pour des écarts types de 10, 20 et 30 unités N établis sur sur un mois; $f_c$ est la fréquence au-dessous de laquelle les fluctuations du temps de propagation sont de plus en plus amorties, du fait que la durée de la période d'observation $T$ est finie. On a pris comme hypothèse un angle de site typique $\varepsilon = 30°$, une longueur de trajet équivalente de 10 km et des moyennes de la composante normale au trajet de la vitesse du vent, $U$ = 2,5 et 10 m/s. Pour des angles de site autres que 30°, les valeurs lues sur les courbes et les vitesses de vent indiquées doivent être divisées par (2 sin ε). On peut admettre que la distribution des fluctuations du temps de propagation est du type gaussien.

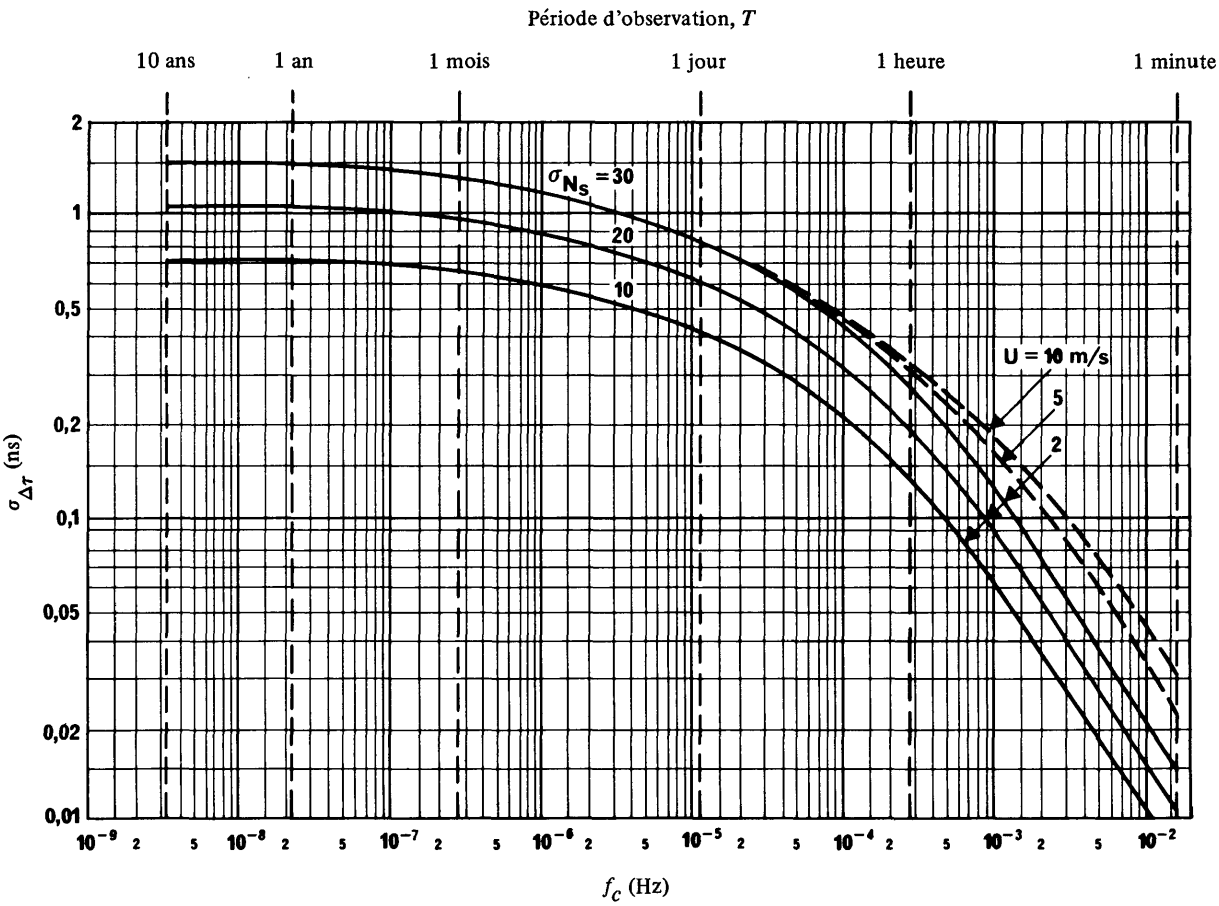



FIGURE 7 – *Variation cumulative de $\sigma_{\Delta\tau}$ en fonction de la fréquence, pour un trajet aller-retour Terre-espace à un angle de site de 30°. Cette famille de courbes a pour paramètre $\sigma_{N_S}$, écart type de $N_S$ pour un mois*

Les courbes de la Fig. 7 sont à employer avec prudence, car elles sont fondées sur un spectre de fréquences moyen et ne sont pas représentatives de la distribution des variations extrêmes qui peuvent se produire. Une limite supérieure approximative pour les courtes durées de la période d'observation $T$ est donnée par $\sigma_{\Delta\tau} \simeq 0{,}25/\sin\varepsilon$ (ns), si $\varepsilon \geqslant 10°$.

13.3 *Temps de propagation à travers la pluie*

Dans les applications où l'on doit tenir compte des fluctuations du temps de propagation pendant quelques minutes au maximum, il faut tenir compte aussi des effets de la pluie. Le changement du temps de propagation dû à une cellule de pluie qui intercepte le trajet peut s'estimer grâce à une méthode similaire à celle qui a été employée pour calculer l'affaiblissement [Nuspl et autres, 1975], jusqu'à 15 GHz environ. Par exemple,

un système de télécommunication par satellite AMRT ayant une marge d'affaiblissement de 6 dB à 14 GHz doit s'accommoder d'une variation du temps de propagation de 0,2 ns. Comme cette valeur est bien plus petite que les «temps de garde» dont l'emploi dans un tel système est courant ou envisagé, on peut négliger les variations du temps de propagation dues à la pluie.

## 14. Affaiblissement dû aux bâtiments

On a mesuré aux Etats-Unis des signaux émis par le satellite ATS-6, tels qu'ils étaient reçus dans des habitations privées [Wells et Tryon, 1976]. Si l'affaiblissement des signaux par des bâtiments charpentés en bois n'était guère fonction des conditions météorologiques ou de l'angle de site au sol (de 3° à 56°), on a constaté qu'il variait systématiquement avec la fréquence, la polarisation, les matériaux de construction, l'isolement et la situation du récepteur dans le bâtiment (voir le Tableau VI). Certaines mesures limitées ont montré que la contribution de certains matériaux d'isolation (sur feuille d'aluminium) et de construction (par exemple, comme dans les automobiles habitables) pouvait atteindre 20 dB. Il faudra procéder à de nouvelles mesures pour déterminer convenablement les effets des habitations privées de ces types et d'autres encore sur l'affaiblissement des signaux.

TABLEAU VI – *Affaiblissement des signaux en ondes décimétriques traversant des bâtiments charpentés en bois* (dB)*

| Constitution du bâtiment | | Fréquence (MHz) et polarisation | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Gros œuvre | Présence d'un isolement autre que métallique | 860 H | 860 V | 1550 V | 2569 V |
| Tout en bois | Plafond seulement | 4,7 | 2,9 | 5,0 | 5,8 |
| | Plafond et murs | 6,3 | 4,5 | 6,6 | 7,4 |
| Bois avec parements briques | Plafond seulement | 5,9 | 4,1 | 6,2 | 7,0 |
| | Plafond et murs | 7,5 | 5,7 | 7,8 | 8,6 |

* Ce tableau est applicable à des pièces adjacentes à un mur extérieur; pour des pièces limitées par des cloisons intérieures, il faut ajouter 0,6 dB aux valeurs indiquées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ALLNUTT, J. E. [1976] Slant-path attenuation and space diversity results using 11.6 GHz radiometers. *Proc. IEEE*, 123, **11**, 1197-1200.

ALLNUTT, J. E. [1977] Variation of attenuation and space diversity with elevation angle on 12 GHz satellite-to-ground radio path. *Electronics Letters*, 13, **12**, 346-347.

BARTHOLOMÉ, P. J. [1977] Propagation experiments at 11/14 GHz as part of the European communications satellite program. *Proc. IEEE*, 65.

BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology.* Dover Publications, New York.

BOSTIAN, C. W., HOLT, S. B., KAUFFMAN, S. R., MANUS, E. A., MARSHALL, R. E, STUTZMAN, W. L. et WILEY, P. H. [1977] Rain depolarization and attenuation measurements at 11.7, 19.4 and 28.56 GHz: a description of the experiment and some preliminary results. In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 403-408.

BRUSSAARD, G. [1976] A meteorological model for rain-induced cross polarization. *IEEE Trans.*, AP-24, 5-11.

BRUSSAARD, G. [1977] Rain attenuation on satellite-Earth paths at 11.4 and 14 GHz. Conférence de l'URSI (Commission F), La Baule, France.

CHEVEAU, L. [août 1977] *EBU Rev.*, **164**, 201-204.

COX, D. C., ARNOLD, H. W. et HOFFMAN, H. H. [1977a] In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 399-402.

COX, D. C., ARNOLD, H. W. et RUSTAKO, A. J. Jr. [1977b] Some observations of anomalous depolarization on Earth-space propagation paths. *Radio Science*, **12**, 435-440.

CNET (Ed.) [1977] Actes du Colloque de l'URSI (Commission F) La Baule, France.

CRANE, R. K. [1967] Coherent pulse transmission through rain. *Trans. IEEE*, AP-15, 252-256.

CRANE, R. K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands. *Proc. IEEE*, **59**, 173-188.

DAVIES, P. G. [1973] Slant-path attenuation at frequencies above 10 GHz. *IEE Conference Pub.*, N° 98 (Propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz), 141-149.

DAVIES, P. G. [1975] Attenuation by cloud and rain of Earth-sun paths at 12-71 GHz. *Electronics Letters*, 11, **22**, 547-548.

DAVIES, P. G. [1976] Diversity measurements of attenuation at 37 GHz with sun-tracking radiometers in a 3-site network. *Proc. IEE*, 123, 8, 765-769.

DEBRUNNER, W. E. et LINIGER, M. [août 1975] Influence of the structure of rain areas on microwave propagation (en allemand). *Tech. Bulletin of PTT*, Vol. 53, 8, Berne, Suisse.

DIJK, J. et MAANDERS, E. J. [28 avril-6 mai 1977] Copolar and cross-polar signals received at 30 GHz from ATS-6. Colloque URSI, La Baule, France.

DINTELMANN, F. et RÜCKER, F. [1977] Attenuation statistics at 30 GHz derived from measurements with ATS-6 and simultaneous radiometric observations at 11.4 GHz, publication spéciale de l'ESA SP-131 (Proc. Final ATS-6 Experimenters Mtg.), septembre 1977, ESTEC, Noordwijk.

EVANS, H. W. [juin 1971] Attenuation on Earth-space paths at frequencies up to 30 GHz. International Conf. on Comm., Montréal, 27-1 à 27-5.

FIMBEL, J. [1975] Radiométrie solaire à 20 GHz. *Ann. des télécomm.*, Vol. 30, 5-6.

FIMBEL, J. et RAMAT, P. [décembre 1977] Mesures de l'affaiblissement et de la dépolarisation à 20 GHz à partir du satellite ATS-6. *Ann. des télécomm.*

FIMBEL, J. et RAMAT, P. [28 avril-6 mai 1977] Mesures de l'affaiblissement et de la dépolarisation à 20 GHz à partir du satellite ATS-6. Colloque URSI, La Baule, France.

FUNAKAWA, K. et OTSU, Y. [janvier-juin 1974] Characteristics of slant-path rain attenuation at 35 GHz obtained by solar radiation and atmospheric emission observations. *Journ. Rech. Atmos.*, Vol. 8.

GIBBINS, C. J. [1974] Tropospheric emission and attenuation statistics at 110 GHz. *Electronics Letters*, 10, 12, 241-242.

HARRIS, J. M. [1977] Tropospheric scintillation of microwaves propagated on low elevation angle Earth-space path. COMSAT Technical Memorandum CL-54-77.

HENDRY, A. et McCORMICK, G. C. [1976] Radar observations of the alignment of precipitation particles by electrostatic fields in thunderstorms. *Journ. Geophys. Res.*, 81, 5353-5357.

HOGG, D. C. et CHU, T. S. [1975] The role of rain in satellite communication. *Proc. IEEE*, Vol. 63, 1308-1331.

HOWELL, R. G. [1977] Crosspolar phase variations at 20 and 30 GHz on a satellite-Earth path. *Electronics Letters*, Vol. 13, 405.

HOWELL, R. G. et THIRLWELL, J. [1977] 20 GHz cross polarization and dual frequency attenuation and scintillation measurements using the ATS-6 satellite. Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 339-344.

HYDE, G. [novembre 1976] ATS-F COMSAT millimeter wave propagation experiment, Partie II. Rapport final de la NASA, Contrat NAS 5-21616.

INKSTER, D. R. et ROGERS, R. R. [1974] More radar-derived statistics on slant-path attenuation at 10 GHz. *Journ. Rech. Atmos.*, Vol. 8, 421-428.

IPPOLITO, L. J. [1971] Effects of precipitation on 15.3 and 31.9 GHz Earth-space transmissions with the ATS-5 satellite. *Proc. IEEE*, Vol. 69.

IPPOLITO, L. J. [novembre 1975] ATS-6 millimeter wave propagation and communications experiments. IEEE AES, 1067-1083.

IPPOLITO, L. J. [avril 1976] 20 and 30 GHz millimeter wave experiments with the ATS-6 satellite. Note technique de la NASA TN D-8197.

JENKINSON, G. F. [1975] Tropical rain attenuation at 11 GHz. A study of 18 months measurements at Innisfail, Queensland. *Australian Telecommunications Research*, Vol. 9, 1, Australia.

JENKINSON, G. F. [mars 1977] Tropical rain attenuation at 11 GHz on Earth-space paths – radiometric measurements in Australia. *Proc. IEEE*, 65, 3, 480-481.

KALININ, A. I. [1974] Spatial non-uniformity of rainfall as an attenuation factor on terrestrial radio paths (en russe). *Elektrosvyaz*, 12.

KALININ, A. I. [1976] Earth-to-space path attenuation due to rainfall (en russe). *Elektrosvyaz*, 5.

KINASE, A. et KIMPARA, A. [août 1969] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 10 GHz band at higher angles of elevation. Note des Laboratoires NHK, N° de série 130.

KINASE, A. et KIMPARA, A. [octobre 1973] Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz band at higher angles of elevation. Note des Laboratoires NHK, N° de série 171.

MAKINO, H. et autres [1971] Measurements of 11 and 18 GHz radio wave attenuation due to rainfall at higher angles of elevation. International Symposium of Antennae and Propagation, N° 2-IV-D2, Japon.

McCORMICK, G. C. et HENDRY, A. [1977] Depolarization by solid hydrometeors. *Electronics Letters*, 13, 83-94.

McEWAN, N. J. et autres [6 janvier 1977] Crosspolarization from high-altitude hydrometeors on a 20 GHz satellite radio path. *Electronics Letters*, 13-14.

McEWAN, N. J., WATSON, P. A., DISSANAYAKE, A. W., HAWORTH, D. P. et VAKILI, V. T. [1977] Crosspolarization from high-altitude hydrometeors on a 20 GHz satellite radio path. *Electronics Letters*, 13, 13-14.

MORITA, K. et HIGUTI, I. [1978] Statistical studies on rain attenuation and site diversity effect on Earth-to-satellite links in microwave and millimeter bands. *Trans. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan*, Vol. E-61 (à paraître).

NOWLAND, W. I. [11-15 octobre 1976] Measurements of precipitation attenuation and depolarization using the 12 GHz transmissions from the CTS. Colloque USNC/URSI, Amherst, Massachusetts.

NOWLAND, W. L., OLSEN, R. et SHKAROFSKY, I. P. [1977] The theoretical relationship between rain depolarization and attenuation. Document soumis à *Electronics Letters*.

NUSPL, P. P., DAVIES, N. G. et OLSEN, R. L. [1975] Ranging and synchronization accuracies in a regional TDMA experiment. Proceedings of the Third International Digital Satellite Communications Conference, Kyoto.

OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter form raindrops and cross polarization due to rain: Calculations at 11, 13, 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Science*, 12, 41 – 41.

OTSU, Y., KOBAYASHI, T., IHARA, T., SHINOZUKA, T. et AOYAMA, S. [1978] Measurement of rain attenuation at 35 GHz along the slant-path at two sites with the height difference of 3 km. *Journ. Radio Res. Labs.*, Japon, Vol. 25, 116 (en cours de publication).

PRATT, T. et BROWNING, D. J. [1977] Attenuation measurements for a 30 GHz satellite-Earth path in central England. In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 361-366.

ROBERTSON, E. A. et SUKHIA, D. E. [mai 1972] Relationship between the atmospheric attenuation of satellite path signals and ground rain rate. Section 3 of papers from the Spring URSI session of experiments utilizing the ATS-5 satellite.

ROGERS, R. R. [1972] Radar-derived statistics on slant-path attenuation at 10 GHz. *Radio Science*, Vol. 7, 631-643.

RUSTAKO, A. J. Jr. [1976] A measurement of rain attenuation and depolarization of the 12 GHz Communications Technology Satellite (CTS) beacon signal – some early results. Présenté au Colloque de l'USNC/URSI, octobre 1976, Amherst, Mass., Etats-Unis d'Amérique.

SATO, K., HOSOYA, Y. et KATO, S. [1978] Rain attenuation characteristics on slant-paths in 20 and 30 GHz bands. *Trans. Inst. Elect. Comm. Engrs., Japan*, Vol. 1, E.61, N° **10**.

SHKAROFSKY, I. P. et MOODY, H. J. [1976] Performance characteristics of antennas for direct broadcasting satellite systems including effects of rain depolarization. *RCA Rev.*, 37, 279-319.

SHKAROFSKY, I. P. [1977] Depolarization due to precipitation in satellite communications. *RCA Rev.*, **38**, 257-309.

SHUTIE, P. F., ALLNUTT, J. E. et MacKENZIE, E. G. [1977a] Satellite-Earth signal depolarization at 30 GHz in the absence of significant fading. *Electronics Letters*, **13**, 1-2.

SHUTIE, P. F., ALLNUTT, J. E. et MacKENZIE, E. G. [1977b] Depolarization results at 30 GHz using transmissions from the ATS-6 satellite. In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 367-370.

STRICKLAND, J. I., SCHLESAK, J. et OLSEN, R. L. [1977] Measurements of depolarization and attenuation at 11.7 GHz using the Communications Technology Satellite. Document soumis à *Electronics Letters*.

STUTZMAN, W. L., BOSTIAN, C. W., MANUS, E. A., MARSHALL, R. E. et WILEY, P. H. [1975] ATS-6 satellite 20 GHz propagation measurements at low elevation angles. *Electronics Letters*, **11**, 635-636.

TAUR, R. R. [1975] Rain depolarization measurements on a satellite-Earth path at 4 GHz. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP-23, 854-855.

TAUR, R. R. et MASS, J. [1976] Rain depolarization and its effects upon satellite communications systems. In Proc. of the IEEE International Conference on Communications, Philadelphia, Etats-Unis d'Amérique.

TAUR, R. R. [1977] Rain depolarization at Taipei Earth Station. COMSAT Technical Memorandum CL-19-77, COMSAT Laboratories, Clarksburg, Maryland, Etats-Unis d'Amérique.

THOMPSON, M. C., WOOD, L. E., JANES, H. B. et SMITH, D. [1975] Phase and amplitude scintillations in the 10 to 40 GHz band. *IEEE*, AP-23, **6**, 792-797.

THOMPSON, P. T., TURNER, D. J. W. et HOWELL, R. G. [1977] Propagation measurements at 30 GHz made during the drift phase of ATS-6. In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 387-392.

TURNER, D. [1972] Variation of tropospheric slant-path attenuation in the UK at 11.75 and 17 GHz. *Electronics Letters*, Vol. 8, 453.

TURNER, D., JARVIS, E. G. et HINCHCLIFFE, R. V. [1970] Aerial noise temperature measurements at 3.95, 11.75 and 17 GHz. Proc. Conf. on Earth Station Technology. *IEE Conf. Publ.*, N° 72, Londres.

WATSON, P. A., McEWAN, N. J., DASSANAYAKE, A. W., HOWARTH, D. P. et VAKILI, V. T. [28 avril-6 mai 1977] Attenuation and cross-polarization measurements at 20 GHz using the ATS-6 satellite with simultaneous radar observations. Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France.

WELLS, P. I. et TRYON, P. V. [1976] The attenuation of VHF radio signals by houses. Rapport de l'O.T., PB 258-447-A/S, NTIS, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.

WILSON, R. W. et MAMMEL, W. L. [avril 1973] Results from a three-radiometer path-diversity experiment. Proc. Conf. on Propagation of Radio Waves at Frequencies above 10 GHz. *IEE Conf. Publ.*, N° 98.

WULFSBERG, K. N. [1964] Sky noise measurements at millimeter wavelengths. *Proc. IEEE*, **52**, 321-322.

YAMADA, M. et YOKOI, H. [1974] Measurements of Earth-space propagation characteristics at 15.5 and 31.6 GHz using celestial radio sources. *Electronics and Communication in Japan*, Vol. 57-B, **2**.

YAMADA, M., OGAWA, A., FURUTA, O. et YUKI, H. [1977] Rain depolarization measurement by using INTELSAT-IV satellite in 4 GHz band at low elevation angle. In Actes du Colloque de l'URSI (Commission F), La Baule, France, 409-419.

YOKOI, H., YAMADA, M. et SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. *Publ. Astronom. Soc.*, Japon, **22**, 511-524.

YOKOI, H., YAMADA, M. et OGAWA, A. [1974] Measurement of precipitation attenuation for satellite communications at low elevation angles. *Journ. Rech. Atmos.*, Vol. 8, **1-2**.

YOKOI, H., YAMADA, M., OGAWA, A. et FURUTA, O. [janvier 1976] Study on the effective path length through rain on an Earth-space path. Note technique du KDD, N° 124.

ZUFFEREY, C. [juin 1976] Crosspolarization measurements at 13 GHz on a slant terrestrial path: comparison between circular and linear polarization. In Proc. from Colloquium on frequency re-use transmission experiment at 180 Mbit/s over the Jungfrau link, Agence européenne de l'espace, Centre technique des PTT suisses, Berne, Suisse.

*Documents du CCIR*

[1974-78]: **a.** 5/24 (Canada); **b.** 5/25 (Canada); **c.** 5/206 (Canada).

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

SECTION 5G: FACTEURS DE PROPAGATION INTERVENANT DANS LES BROUILLAGES

*Avis et rapports*

AVIS 452-2 *

## DONNÉES RELATIVES A LA PROPAGATION POUR L'ÉVALUATION DES BROUILLAGES DANS LES SERVICES SPATIAUX OU DANS LES SERVICES DE TERRE OU ENTRE EUX, ET POUR LE CALCUL DES DISTANCES DE COORDINATION

(1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* le § 2.9 de la Recommandation N° Spa2 – 15 de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales (Genève, 1971);

*b)* que la zone de coordination est la zone entourant une station terrienne, et telle que tout brouillage entre une station terrienne donnée et les stations de terre situées à l'extérieur de cette zone peut-être considéré comme négligeable;

*c)* que la détermination de la zone de coordination devrait être fondée sur les meilleures données de propagation disponibles et que les méthodes de prévision de l'affaiblissement le long d'un trajet de brouillage devraient être compatibles avec celles qui permettent de déterminer la zone de coordination correspondante,

ÉMET A L'UNANIMITÉ L'AVIS

1. que, pour évaluer les niveaux de brouillage aux fréquences supérieures à 600 MHz environ, les administrations utilisent les méthodes de calcul décrites dans le Rapport 569-1;

2. que, pour les fréquences inférieures à 600 MHz environ, les administrations utilisent l'Avis 370-3 qui contient des données relatives à des pourcentages de temps jusqu'à 1%, pour obtenir une première estimation de la probabilité de brouillage. Il convient d'appliquer les méthodes décrites dans le Rapport 238-3 pour des calculs plus précis à tous les pourcentages de temps;

3. que, pour déterminer la zone de coordination, dans le cas des fréquences comprises entre 1 et 40 GHz, les administrations utilisent les méthodes de calcul de la propagation exposées dans le Rapport 724.

---

RAPPORT 569-1 **

## ÉVALUATION DES FACTEURS DE PROPAGATION LIÉS AUX PROBLÈMES DE BROUILLAGE AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 0,6 GHz ENVIRON

(Question 5-3/5)

(1974 - 1978)

### 1. Introduction

Du fait de l'encombrement du spectre des fréquences radioélectriques, il a fallu partager les fréquences entre un certain nombre de services utilisant des systèmes entièrement de Terre ainsi que des systèmes mixtes Terre/espace. Il existe donc des possibilités de brouillage entre systèmes de Terre ainsi qu'entre systèmes de Terre et systèmes spatiaux. En conséquence, l'ingénieur chargé de la planification de ces systèmes doit savoir comment définir un signal fiable en l'absence de brouillage et comment évaluer le brouillage qui peut se produire en raison du partage des fréquences avec d'autres systèmes. C'est cette seconde question, concernant l'apparition de brouillages, qui est traitée dans le présent Rapport; on y trouvera aussi la description de méthodes d'évaluation quantitative de ce facteur pour les fréquences supérieures à 0,6 GHz environ.

Pour évaluer les brouillages entre différents systèmes radioélectriques, il est nécessaire de connaître la répartition statistique de la différence en décibels entre les niveaux du signal brouilleur et du signal utile. Pour la plupart des systèmes radioélectriques, sauf les faisceaux hertziens troposphériques, le niveau du signal utile peut être considéré approximativement comme constant pendant la plus grande partie du temps.

C'est pourquoi il est indispensable que l'ingénieur dispose de statistiques sur les conditions d'apparition du brouillage, dont la variation est due à l'existence de plusieurs mécanismes différents de propagation, chacun d'eux étant à son tour sujet à des variations qui découlent des caractéristiques du milieu de propagation au niveau de la

---

* L'attention des Commissions d'études 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11 est attirée sur cet Avis.

** Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

troposphère. Les modifications du milieu de propagation sont fonction du climat et il est nécessaire de tenir compte des effets liés aux caractéristiques de propagation par temps clair et des phénomènes qui peuvent se produire en raison de la présence d'hydrométéores sur le trajet de propagation.

Les méthodes décrites dans le présent Rapport portent essentiellement sur l'évaluation de l'intensité des signaux sur des trajets de point à point. Dans la plupart des cas, les stations de faisceaux hertziens se trouvent dans des sites exposés. Il devrait néanmoins être également possible d'appliquer les données de propagation indiquées dans le présent Rapport à des problèmes spécifiques de brouillage liés à la planification d'autres services, notamment les services de radiodiffusion et les services mobiles. A cet effet, il faudra prévoir des tolérances pour les affaiblissements supplémentaires dus aux irrégularités du terrain, à la végétation, aux constructions dans le voisinage des stations de ces services. Le Rapport 239-4 contient des informations sur ces affaiblissements supplémentaires.

Pour la planification des systèmes, il est généralement nécessaire d'évaluer le niveau de brouillage qui ne doit pas être dépassé pendant plus de 1% du temps des mois les plus défavorables et, dans certains cas, pendant plus de 20% du temps. Une grande partie du présent Rapport traite uniquement des méthodes d'évaluation du brouillage qui ne doit pas être dépassé pendant des pourcentages de temps de l'ordre de 1% et moins. Lorsque les données de propagation pertinentes ne figurent pas dans d'autres Rapports du CCIR, on les a indiquées ici pour l'évaluation du niveau de brouillage qui n'est pas dépassé pendant plus de 20% du temps. Pour évaluer les brouillages peu intenses, les principaux modes de propagation à prendre en considération sont les suivants:

- visibilité directe;
- diffraction sur des obstacles isolés;
- diffraction sur les irrégularités du terrain;
- diffusion troposphérique vers l'avant.

Les autres mécanismes à considérer pour évaluer les brouillages de niveau plus élevé qui ne se produisent toutefois que pendant des petits pourcentages de temps, habituellement de l'ordre de 1% ou moins, sont les suivants:

- propagation guidée (superréfraction provoquant la formation de couches ou de conduits);
- diffusion par les hydrométéores (surtout la pluie).

Les méthodes permettant de prévoir l'affaiblissement de transmission pour chacun de ces mécanismes de propagation sont fondées sur l'utilisation de données relatives aux caractéristiques suivantes: tracé du trajet, caractéristiques générales ou spécifiques de la surface terrestre, conditions climatiques générales ou spécifiques et certaines caractéristiques des stations; toutefois, les divers mécanismes de propagation ne réagissent pas tous de la même manière à ces caractéristiques, et ils ne présentent pas non plus les mêmes variations dans le temps. Il est donc nécessaire de déterminer l'affaiblissement de transmission pour chaque mécanisme et de déterminer ceux qui produisent le champ le plus élevé dans des conditions données. Généralement, la prédominance de l'un de ces mécanismes est telle que l'on peut négliger les autres.

Dans tous les cas autres que ceux de la diffusion troposphérique vers l'avant et de la diffusion par la pluie, les données de propagation indiquées dans le présent Rapport sont spécifiées en termes d'affaiblissement, en décibels, par rapport à la transmission en espace libre. Par ailleurs, les caractéristiques de propagation associées à la diffusion par la pluie dépendent des diagrammes de rayonnement des antennes, et il est donc commode de présenter les données en termes d'affaiblissement de transmission, c'est-à-dire du rapport, en décibels, entre la puissance appliquée à l'antenne d'émission et la puissance à l'entrée du récepteur radioélectrique à l'autre extrémité du trajet.

Il existe toutefois un facteur de brouillage qui ne peut pas être étudié quantitativement dans ce contexte. Le brouillage dû à une diffusion causée par un aéronef se caractérise par une courte durée et une intensité relative élevée, le couplage entre les deux faisceaux d'antenne étant effectué par l'aéronef lui-même. La probabilité d'apparition de ce phénomène dépend de la fréquence des mouvements des aéronefs dans les intersections des lobes principaux ou des lobes secondaires des antennes. Il faut donc éviter de placer ces intersections au voisinage des couloirs de navigation aérienne, notamment de ceux où le trafic aérien est intense. C'est un facteur à prendre en considération du point de vue de la propagation lorsque le service est au stade de la planification.

Il n'est pas encore possible de faire une évaluation parfaitement rigoureuse du brouillage qui se produira dans des conditions déterminées, mais les méthodes proposées dans le présent Rapport permettront généralement de faire l'avant-projet d'un système de façon à éviter de grandes difficultés de brouillage. En outre, ces méthodes aideront à déterminer les conditions dans lesquelles il y a une grande probabilité de brouillage nuisible et pour lesquelles il vaut donc la peine de faire des calculs plus rigoureux fondés sur des données détaillées d'ordre topographique et climatologique.

Pour évaluer les distances de coordination, il convient de calculer le niveau des champs brouilleurs. Le Rapport 724 expose une méthode de calcul simplifiée qui indique s'il faut suivre des procédures de coordination plus rigoureuses; si tel est le cas, le présent Rapport permet de procéder à des calculs détaillés.

## 2. Mécanismes de propagation et caractéristiques des trajets

Pour calculer l'affaiblissement, on doit connaître quel est le mécanisme de propagation qui se produit. Cependant, les données de départ sont plutôt les caractéristiques géographiques des trajets. Il est donc nécessaire d'établir une classification des mécanismes de propagation et des caractéristiques des trajets.

## 2.1 *Mécanismes de propagation*

Tous les mécanismes de propagation peuvent être classés en deux catégories: la propagation de surface (visibilité directe et propagation par onde de sol) et la propagation de volume.

### 2.1.1 *Propagation de surface*

Dans cette catégorie, la surface de la Terre intervient par la réflexion et la diffraction tandis que l'atmosphère située au-dessus de cette surface exerce un effet global de réfraction.

Pour des raisons d'ordre pratique, on fait souvent une distinction entre les trajets en visibilité directe (c'est-à-dire ceux pour lesquels la diffraction peut être négligée) et les trajets transhorizon. Il convient toutefois de noter qu'un trajet de brouillage assez long peut être tantôt en visibilité directe et tantôt transhorizon, selon la valeur du gradient vertical de l'indice de réfraction de l'atmosphère au moment considéré.

Ceci est illustré par les Fig. 1a et 1b qui montrent, pour les fréquences de 4 et 12 GHz respectivement, la variation de l'affaiblissement dû à la diffraction par une Terre sphérique lisse, en fonction du gradient vertical de l'indice de réfraction (Rapport 715). Les antennes sont supposées placées à des hauteurs typiques de 100 m et 15 m.

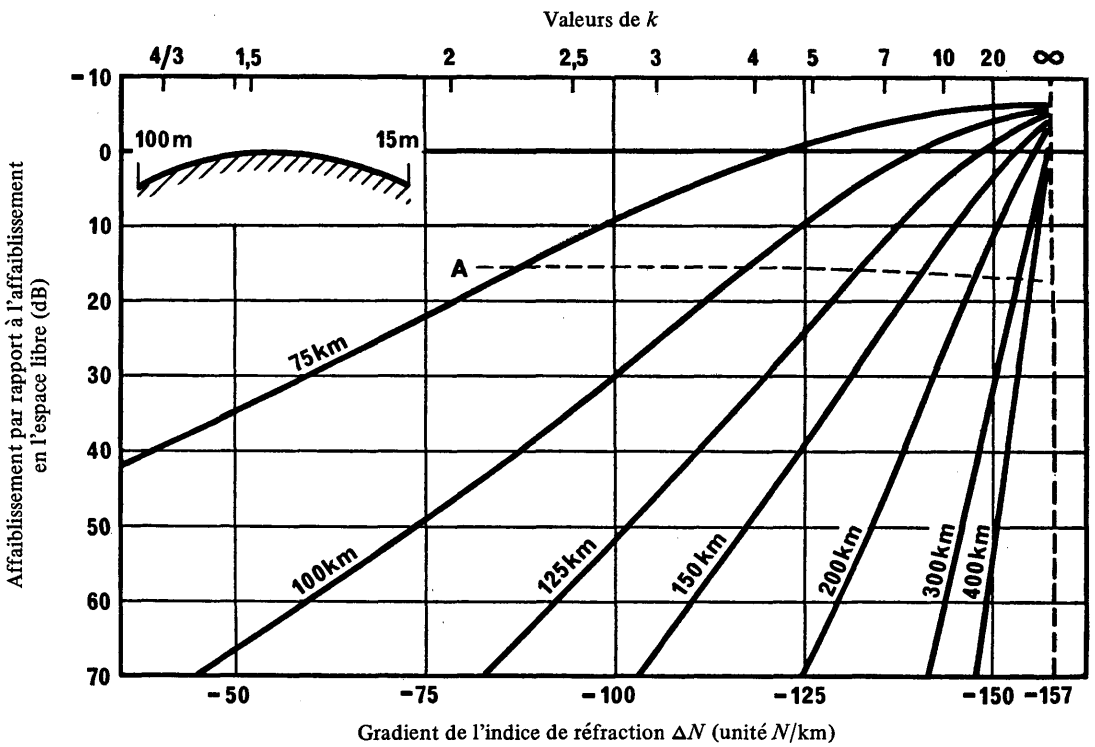



FIGURE 1*a* – *Affaiblissement supplémentaire dû à une diffraction sphérique (4 GHz) en fonction du gradient de l'indice de réfraction* $\Delta N$

A: Limite de visibilité

On peut voir d'après ces figures que, pour un trajet de 150 km, lorsque le gradient vertical de l'indice de réfraction est positif ou moins négatif que $-140$ unités $N$/km, le trajet est, d'abord, un trajet de diffraction avec un affaiblissement élevé, puis, lorsque le gradient est compris entre $-140$ et $-157$ unités $N$/km, cet affaiblissement diminue et le trajet devient un trajet en visibilité directe. Au-delà de $-157$ unités $N$/km, il se forme un conduit troposphérique avec un affaiblissement faible. Dans ce cas, en raison de la hauteur limitée du conduit, il n'est généralement pas possible que le trajet direct existe et l'on ne trouve que des trajets comportant plusieurs points de réflexion sur le sol.

On peut trouver également des cas plus complexes comme celui des conduits situés au-dessus du niveau du sol.

Pour tous ces mécanismes de surface, la propagation s'effectue plus ou moins suivant un arc de grand cercle.

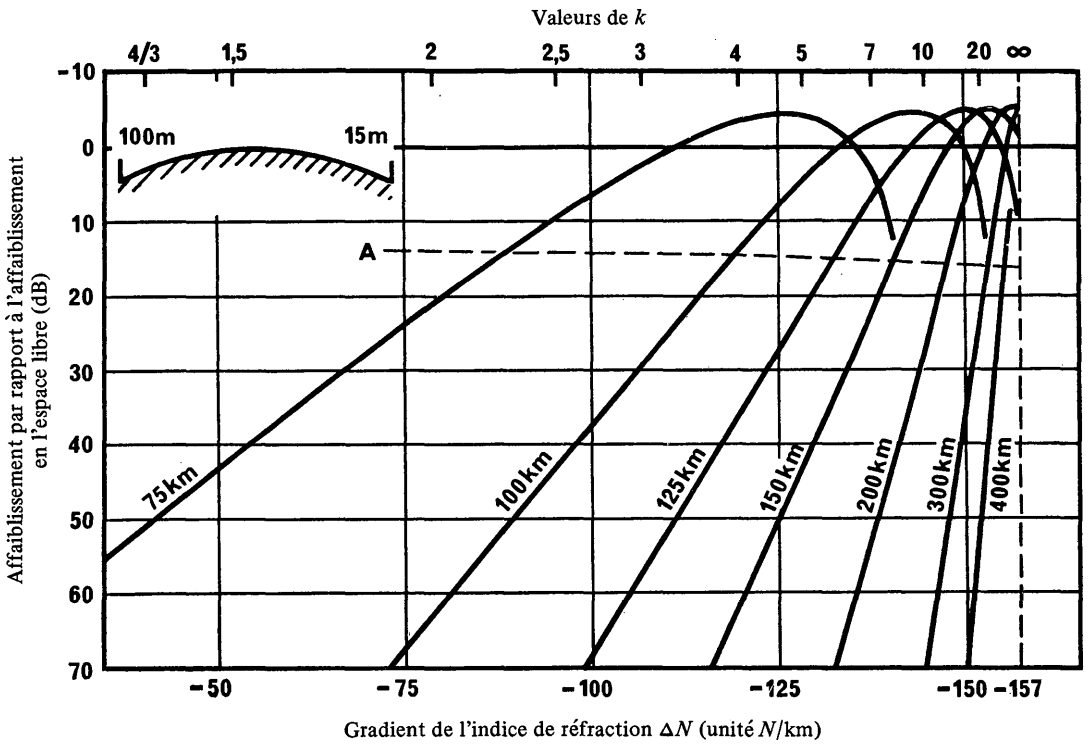



FIGURE 1*b* – *Affaiblissement supplémentaire dû à une diffraction sphérique (12 GHz) en fonction du gradient de l'indice de réfraction* $\Delta N$

A: Limite de visibilité

2.1.2 *Propagation de volume*

La propagation de volume est due à la diffusion par la structure fine de la troposphère.

La surface de la Terre ne joue aucun rôle, si ce n'est pour limiter le tracé du trajet. Les deux principaux mécanismes de propagation appartenant à cette catégorie sont, d'une part, la diffusion troposphérique causée par les variations de l'indice de réfraction dues à la composition gazeuse de l'atmosphère et, d'autre part, la diffusion causée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, notamment les gouttes de pluie.

La diffusion troposphérique existe en permanence et la propagation qui en résulte s'effectue suivant un arc de grand cercle. Elle subit toujours un affaiblissement relativement élevé en mode de diffusion vraie lorsque toute forme de superréfraction est absente. La diffusion par les hydrométéores est évidemment intermittente, mais c'est le seul mécanisme qui donne lieu à une propagation notable en dehors de l'arc de grand cercle. Plus grand est le taux de précipitation, plus forte est la diffusion; dans ces conditions, l'affaiblissement du signal brouilleur peut être assez minime.

2.2 *Caractéristiques des trajets*

Pour évaluer le brouillage, il faut considérer deux types de trajet. Tous les modes de propagation autres que la diffusion par des particules produisent le champ maximal dans le plan du grand cercle passant par l'émetteur et le récepteur; il suffit donc, dans ce cas, d'étudier les trajets contenus dans le plan d'un grand cercle. Au contraire, la diffusion par les particules ne se limite pas au plan du grand cercle mais dépend très étroitement des caractéristiques de rayonnement et des caractéristiques géométriques des antennes des stations d'émission et de réception; les caractéristiques du terrain ont peu d'effet, à ceci près qu'elles limitent les caractéristiques de rayonnement des antennes.

2.2.1 *Trajets situés dans le plan du grand cercle*

Pour évaluer l'affaiblissement sur un trajet qui suit un arc de grand cercle, il est nécessaire de déterminer le tracé effectif du trajet.

La valeur saisonnière maximale de $\Delta N$, servant à localiser le trajet étudié, doit être déterminée d'après les Fig. 4 à 7 du Rapport 563-1. On calcule alors le rayon équivalent de la Terre «*ka*» d'après l'expression:

$$ka \simeq (-\Delta N \cdot 10^{-6} + 1/a)^{-1} \quad \text{km} \qquad (1)$$

où $a = 6400$ km est le rayon terrestre réel. Pour un long trajet, il faut utiliser la moyenne des plus petites valeurs saisonnières de $\Delta N$, grandeur normalement positive.

En utilisant ce rayon équivalent de la Terre ainsi que les données relatives au profil du terrain le long du trajet, on peut déterminer le type de trajet simplement par la géométrie. Il est utile d'établir une distinction entre les types suivants:

*a)* les trajets en visibilité directe, y compris avec incidence rasante;

*b)* les trajets transhorizon, avec au maximum trois grands obstacles isolés mais sans occultation par la courbure de la surface terrestre; on a alors un trajet avec diffraction sur des arêtes en lame de couteau;

*c)* les trajets transhorizon, avec au maximum trois grands obstacles isolés et tels que la courbure de la surface terrestre occulte aussi le trajet; on peut dire qu'il s'agit d'un trajet très long avec diffraction sur des arêtes en lame de couteau;

*d)* les trajets transhorizon, avec plus de trois grands obstacles ou un terrain très irrégulier ($\Delta H \geqslant 200$ m) *. C'est le cas d'un trajet au-dessus d'un terrain irrégulier;

*e)* les trajets transhorizon sans grands obstacles (notamment les trajets maritimes) ($\Delta H < 200$ m) *. Ce cas est celui d'un trajet au-dessus d'une surface terrestre uniforme.

On peut déterminer le profil effectif du trajet pour les pourcentages de temps intéressants d'après les données statistiques établies pour les valeurs de $\Delta N$.

2.2.2 *Trajets situés en dehors du plan du grand cercle*

La diffusion due à la pluie est essentiellement isotrope. Par conséquent, le trajet à affaiblissement de transmission minimal dépendra de la distribution de la densité de la pluie dans la troposphère et des relations géométriques entre les orientations des antennes.

## 3. Calcul de l'affaiblissement de transmission pour les mécanismes de propagation de surface

### 3.1 *Visibilité directe*

Lorsque les calculs montrent que, pour le rayon terrestre équivalent déterminé selon les indications du § 2 pour des conditions de référence à long terme, le trajet de propagation étudié est en visibilité géométrique sans obstacle qui occulte la première zone de Fresnel, on peut tout d'abord supposer que l'affaiblissement de transmission de référence est égal à l'affaiblissement en espace libre. Les valeurs obtenues doivent ensuite être augmentées pour tenir compte de l'absorption gazeuse, que l'on peut évaluer d'après les courbes du Rapport 719, en supposant que la concentration de la vapeur d'eau dans différentes régions du monde a les valeurs suivantes:

trajet terrestre, latitude $\geqslant 23°$ : 1 g/m$^3$

trajet maritime, latitude $\geqslant 23°$<br>trajet terrestre, latitude $< 23°$ : 2 g/m$^3$

trajet maritime, latitude $< 23°$ : 5 g/m$^3$

Le résultat obtenu représente la valeur de référence à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence. L'affaiblissement de référence qui n'est pas dépassé pendant $q$ % du temps est alors:

$$A_s + A_g - G_q \qquad (2)$$

dans laquelle

$A_s$ est l'affaiblissement en espace libre,

$A_g$ est l'affaiblissement dû à l'absorption gazeuse,

$G_q$ est la somme statistique des effets de focalisation instantanés et d'interférence entre rayons qui arrivent par des trajets différents dans l'atmosphère. Les valeurs de $G_q$ sont données dans le Tableau I.

TABLEAU I – *Valeurs de $G_q$ (dB) non dépassées pendant plus de q% du temps*

| $q$ | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1 |
|---|---|---|---|---|
| $G_q$ | 8,5 | 7,0 | 6,0 | 4,5 |

* $\Delta H$ est la différence entre les hauteurs dépassées en 10% et 90% des points d'une section d'un trajet. Pour les sections maritimes, $\Delta H$ est supposé égal à zéro.

Les valeurs indiquées dans le Tableau I s'appliquent à des trajets de 50 km et plus; pour les distances inférieures, elles peuvent être réduites à proportion.

Pour évaluer l'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant 20% du temps, il faut augmenter l'affaiblissement en espace libre de 1,5 dB sauf lorsque le trajet présente une incidence rasante ou quasi rasante avec le terrain qu'il franchit (c'est-à-dire à moins des 2/3 de la première zone de Fresnel). La diffraction peut alors produire un affaiblissement inférieur aux valeurs en espace libre. Toutefois, pour évaluer cet affaiblissement, il faut connaître les valeurs appropriées du gradient du coïndice au sol; la méthode de calcul est décrite dans le Rapport 715.

### 3.2 *Trajets transhorizon*

Les méthodes générales d'évaluation de l'affaiblissement dû à la diffraction par le sol sont étudiées dans le Rapport 715. La méthode de prévision indiquée ci-après complète ces informations.

La diffraction par la courbure de la surface terrestre provoque un affaiblissement important dans les conditions normales de réfraction. Même en l'absence de superréfraction, le champ dû à la diffraction sur la courbure de la surface terrestre peut prendre de l'importance. Pour une surface terrestre uniforme, l'affaiblissement dû à la diffraction dépend du rayon terrestre équivalent, donné par l'expression (1) du § 2 (voir les Fig. 1a et 1b).

En cas de forte superréfraction dans l'atmosphère (par exemple, un gradient du coïndice de réfraction s'abaissant au-dessous de $-120$ unités $N$/km environ), l'affaiblissement effectif diminue rapidement et, à partir de $-157$ unités $N$/km, on observe la formation de conduits radioélectriques. Bien qu'étant très différents dans leurs principes, ces deux modes de propagation, par diffraction et par conduits radioélectriques, ont néanmoins plusieurs caractéristiques communes:

- Dans les deux cas, la propagation est essentiellement déterminée par la nature du terrain (configuration, végétation) et par les caractéristiques des couches inférieures de l'atmosphère (jusqu'à quelques centaines de mètres au maximum).
- Dans les deux cas, le niveau du signal reçu est une fonction quasi exponentielle de la distance. En effet, dans le cas de la diffraction, une même fonction exponentielle constitue une bonne approximation des fonctions plus compliquées qui devraient être utilisées et, dans le cas de la propagation par conduits, une telle fonction exprime l'affaiblissement résultant des imperfections du mécanisme de guidage, tout comme pour n'importe quelle ligne de transmission.

En résumé, il y a continuité entre les deux phénomènes, car les lois applicables sont de forme similaire et la nature du terrain est un paramètre important.

#### 3.2.1 *Diffraction par des arêtes en lame de couteau*

Ce mécanisme s'applique à des trajets comportant au maximum trois grands obstacles distincts, chacun étant visible des obstacles voisins ou d'une extrémité du trajet.

On détermine l'affaiblissement sur ce type de trajet, par rapport à l'affaiblissement en espace libre, en appliquant l'équation (3.5) du Rapport 715 pour obtenir la valeur de référence à long terme. En présence d'obstacles arrondis dont le rayon de courbure dépasse 6 m, il se peut que la valeur prévue pour l'affaiblissement soit trop élevée et il convient donc d'utiliser cette donnée avec prudence. S'il y a plusieurs obstacles, il faut déterminer l'affaiblissement séparément pour chacun d'eux, pour les sections de trajet limitées, les unes, par une station terminale visible et l'obstacle suivant, l'autre, par les deux obstacles adjacents de part et d'autre (cas de trois obstacles). On applique ensuite, à la longueur totale du trajet, les corrections nécessaires pour tenir compte du pourcentage de temps et de l'absorption gazeuse, selon les indications données au § 3.1.

#### 3.2.2 *Diffraction sphérique*

Ce mécanisme s'applique à des trajets qui ne franchissent aucune grande arête de diffraction et à des pourcentages de temps de 20% ou plus.

Pour obtenir l'affaiblissement sur un tel trajet par rapport à l'affaiblissement en espace libre, on applique l'équation (2.1) du Rapport 715. Pour un terrain irrégulier, on utilise le modèle à rayon égal aux 4/3 du rayon terrestre, qui est illustré par la Fig. 2, en calculant les valeurs de $\chi_1$, $\chi_2$ et $\chi_0$ comme suit:

$$\chi_1 = 670\, d_{Lt}\, (f/a_1^2)^{1/3}$$

$$\chi_2 = 670\, d_{Lr}\, (f/a_2^2)^{1/3}$$

$$\chi_0 = \chi_1 + \chi_2 + 670\, f^{1/3}\, [d_{st} a_t^{-2/3} + d_{sr}\, a_r^{-2/3}]$$

où $a_1$ et $a_2$ sont les rayons terrestres équivalents pour les deux extrémités du trajet, obtenus d'après les indications du § 2. La courbe de $F(\chi)$ donnée dans le Rapport 715 est à utiliser avec $K = 0{,}03$.

Lorsque le trajet passe au-dessus d'un terrain homogène, il faut utiliser un seul rayon terrestre équivalent: $a_1 = a_2 = a_t = a_r$, déterminé d'après la valeur moyenne de $\Delta N$ pour ce trajet (voir le § 2).

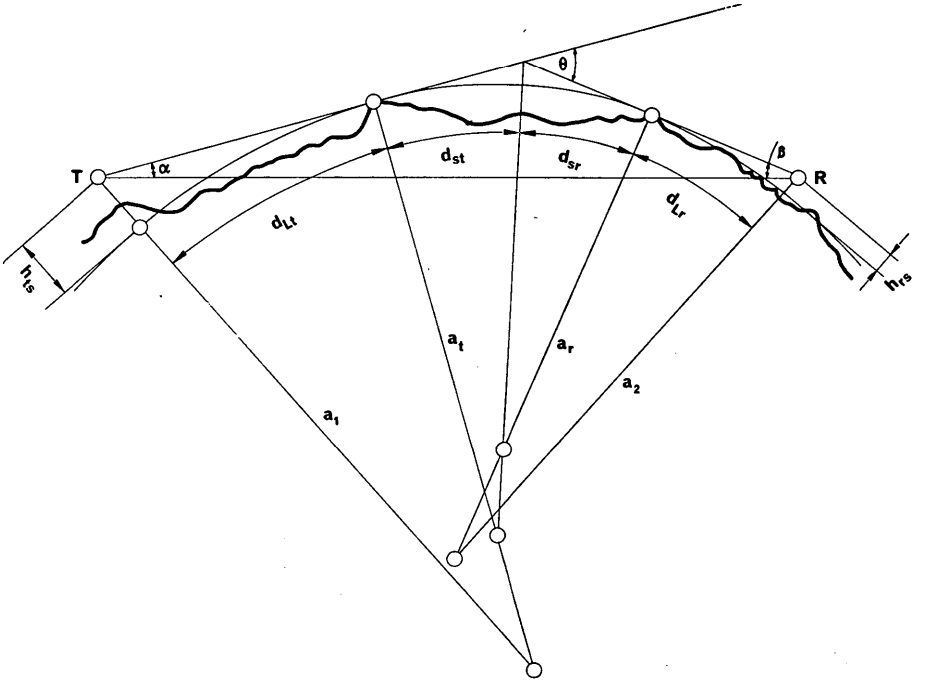



FIGURE 2 – *Tracé du trajet pour la diffraction*

$$\alpha \simeq \frac{d}{2a} + \theta_{et} + \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} \qquad \beta \simeq \frac{d}{2a} + \theta_{er} - \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d}$$

$$\theta_{et} \simeq \frac{h_{Lt} - h_{ts}}{d_{Lt}} - \frac{d_{Lt}}{2a} \qquad \theta_{er} \simeq \frac{h_{Lr} - h_{rs}}{d_{Lr}} - \frac{d_{Lr}}{2a}$$

$$d_{st} = \frac{d\beta}{\theta} - d_{Lt} \qquad d_{sr} = \frac{d\alpha}{\theta} - d_{Lr}$$

$$\theta = \frac{d}{a} + \theta_{et} + \theta_{er}$$

$$D_s = d_{st} + d_{sr}$$

$$a_t = D_s\, d_{st}/(\theta d_{sr}) \qquad a_r = D_s\, d_{sr}/(\theta d_{st})$$

$a_1, a_2$ : rayons terrestres équivalents aux extrémités du trajet

$h_{ts}, h_{rs}$ : Hauteurs des antennes d'émission ($t$) et de réception ($r$) au-dessus du niveau moyen de la mer (km)

$h_{Lt}, h_{Lr}$ : Hauteurs des obstacles à l'horizon correspondants au-dessus du niveau moyen de la mer (km)

$\theta$ est exprimé en milliradians

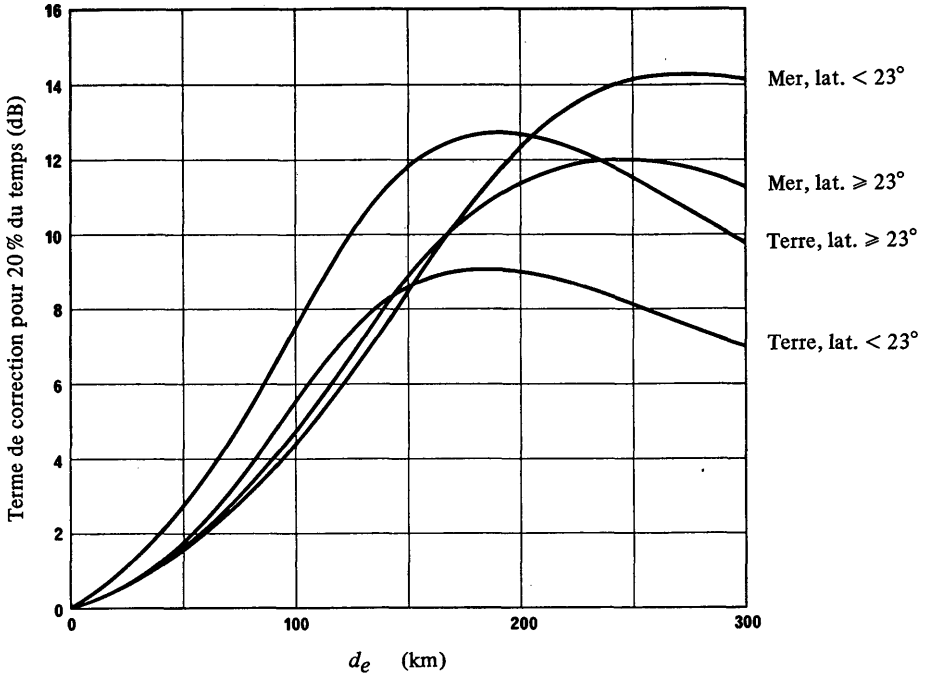



FIGURE 3 – *Terme de correction pour 20% du temps selon les régions climatiques*

(à soustraire de la valeur à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence)

Pour estimer l'affaiblissement dû à la diffraction par rapport à l'affaiblissement en espace libre, non dépassé pendant plus de 20% du temps, on utilise les courbes de la Fig. 3. Le paramètre $d_e$ est défini comme suit:

$$d_e = \begin{cases} 130\ d/d_{ref}\ (\text{km});\ d \leqslant d_{ref} \\ 130 + d - d_{ref}\ (\text{km});\ d > d_{ref} \end{cases} \qquad (3a)$$

où $d$ est la longueur totale du trajet et $d_{ref}$ est défini comme suit:

$$d_{ref} = \begin{cases} 8{,}5\ (33{,}52\ f^{-1/3} + 2{,}3 - \theta_{et} - \theta_{er})\ (\text{km}) \\ \text{ou } 20\ \text{km, si cette valeur est plus grande} \end{cases} \qquad (3b)$$

avec $f$: fréquence en MHz; $\theta_{et}$ et $\theta_{er}$ angles de site de l'horizon aux extrémités du trajet, en milliradians.

3.2.3 *Superréfraction et guidage*

Ce mécanisme s'applique à des trajets ne franchissant aucune grande arête de diffraction, et pour des pourcentages de temps très faibles.

3.2.3.1 *Méthode de calcul*

Cette méthode est fondée sur le calcul de la propagation de l'énergie dans un conduit troposphérique. Toutefois, elle est également applicable en cas de forte superréfraction sans formation de conduits, en raison de la ressemblance entre les fonctions mathématiques dans les deux cas.

Il a été démontré que la quantité dont l'affaiblissement de transmission est supérieur à l'affaiblissement en visibilité directe, $A$, qui n'est dépassée que pendant de faibles pourcentages du temps et résulte de la superréfraction et de la formation de conduits, peut s'exprimer par:

$$A = -10 \log d + 10 \log (2d_0) + (C_a + C_s)\ d \qquad \text{dB} \qquad (4)$$

où:

$d$ : longueur du trajet (km);

$C_a$: coefficient de fuite qui dépend de l'atmosphère (Tableau II); il est indépendant de la fréquence entre 0,6 et 15 GHz;

$C_s$: coefficient de fuite qui dépend de la surface terrestre, de $\Delta H$ et de la fréquence (Fig. 4);

$d_0$: distance minimale de couplage (km) dans le conduit radioélectrique, qui dépend des conditions radioclimatiques et du pourcentage de temps (Tableau III).

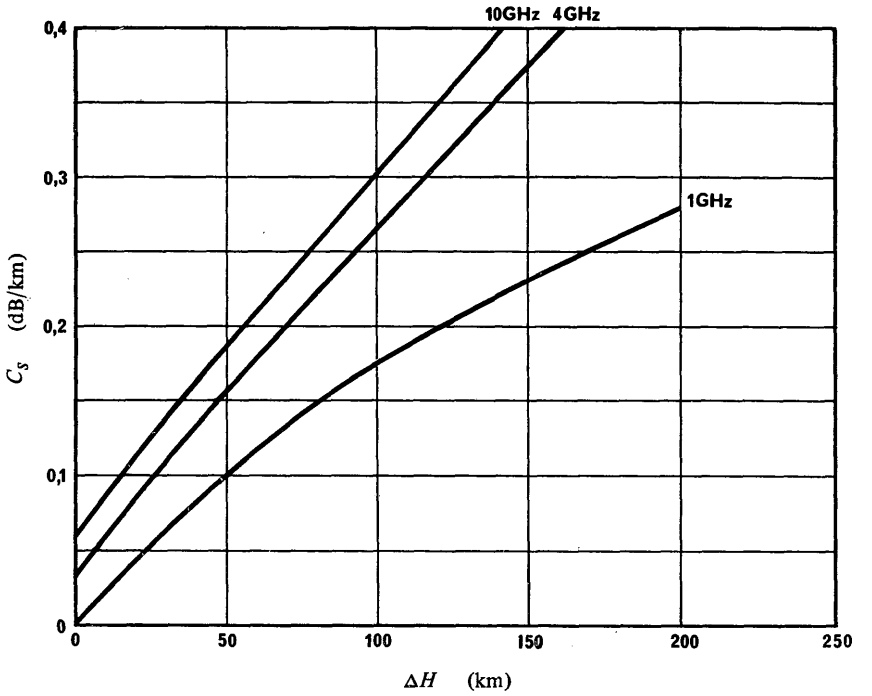



FIGURE 4 – *Variation de $C_S$ en fonction de $\Delta H$, pour différentes fréquences*

TABLEAU II – *Valeurs du coefficient de fuite, $C_a$ (dB/km)*

| Pourcentage du temps | 0,001 % | 0,01 % | 0,1 % | 1 % |
|---|---|---|---|---|
| Zones dans lesquelles la valeur mensuelle maximale de $\Delta N$ est: * | $C_a$(4) | | | |
| > 80 | (1) | (1) | (1) | (1) |
| $55 < \Delta N < 80$(2) | $0{,}7 \times 10^{-2}$ (5) | $2 \times 10^{-2}$ | $3{,}2 \times 10^{-2}$ | $4{,}6 \times 10^{-2}$ |
| $40 < \Delta N < 55$(3) | $0{,}7 \times 10^{-2}$ | $2 \times 10^{-2}$ | $3{,}8 \times 10^{-2}$ | $6{,}2 \times 10^{-2}$ |
| $\Delta N < 40$ | Aucune donnée disponible | | | |

* Valeurs extraites des Fig. 4, 5, 6 et 7 du Rapport 563-1

(1) Aucune mesure n'a été faite. Les valeurs de $C_a$ sont probablement inférieures ou au moins égales à celles de la zone suivante ($55 < \Delta N < 80$).

(2) Données vérifiées pour la zone méditerranéenne.

(3) Données vérifiées sur des trajets terrestres situés au nord-ouest de l'Europe et dans la partie nord-ouest de l'U.R.S.S., ainsi que sur la mer du Nord, la Manche et la mer Baltique.

(4) Ces valeurs suivent une loi gaussienne et peuvent être interpolées.

(5) Valeur obtenue par extrapolation.

TABLEAU III – *Valeurs de 10 log (2 $d_0$)*

| Pourcentage du temps | 0,001 % | 0,01 % | 0,1 % | 1 % |
|---|---|---|---|---|
| Zones dans lesquelles la valeur mensuelle maximale de $\Delta N$ est: * $> 80$(1) | – | 2 | 5 | 6 |
| $55 < \Delta N < 80$(2) | 6,0 | 6,5 | 7 | 8,5 |
| $40 < \Delta N < 55$(3) | 6,5 | 7 | 8 | 11 |
| $\Delta N < 40$(4) | Aucune donnée disponible | | | |

* Valeurs extraites des Fig. 4, 5, 6 et 7 du Rapport 563-1

(1) Données vérifiées au voisinage de Dakar.

(2) Données vérifiées pour la zone méditerranéenne.

(3) Données vérifiées sur un trajet terrestre au nord-ouest de l'Europe et dans la partie nord-ouest de l'U.R.S.S., ainsi que sur la mer du Nord, la Manche et la mer Baltique.

(4) Ces valeurs suivent une loi gaussienne et peuvent être interpolées.

*Note.* – Dans les cartes du Rapport 563-1, les courbes des isogradients sont assez approximatives; de nombreuses données sont donc encore nécessaires pour mieux déterminer les valeurs de $2d_0$ dans les différentes régions du globe.

Les variations de $2d_0$ d'une zone à l'autre sont faibles. Pour les trajets couvrant plusieurs zones, il suffira de prendre la valeur représentative de 10 log ($2d_0$) pour la zone dans laquelle $\Delta N$ a les plus grandes valeurs.

Pour évaluer la quantité d'énergie introduite par couplage dans ce mode de propagation, lorsque l'une des extrémités, ou les deux, voient l'horizon sous un angle de site positif, il faut ajouter à la valeur de l'affaiblissement une perte supplémentaire qui est assimilable à un affaiblissement dû à la diffraction sur une seule arête en lame de couteau, dans l'hypothèse que l'angle de diffraction $\theta$ est égal à l'angle de site de l'horizon $\theta_e$. Pour évaluer cet affaiblissement supplémentaire à 4 GHz, on peut utiliser les courbes de la Fig. 5.

Pour d'autres fréquences, il faut ajouter le terme correctif 10 log ($f$/4) dB, dans lequel $f$ est la fréquence en GHz. *

La possibilité que les signaux reçus en ondes décimétriques et centimétriques soient renforcés par la présence de neige sur les crêtes des montagnes est envisagée dans le Rapport 236-4.

3.2.3.2 *Application*

Si le trajet est entièrement maritime, $C_s$ est égal à zéro.

Si le trajet est mixte et franchit des terrains ayant des caractéristiques différentes ou des tronçons maritimes, on remplace, dans l'équation (4), le terme $(C_a + C_s)\, d$ par:

$$C_a d + \sum_1^n C_{si}\, d_i \quad \text{où} \quad \sum_1^n d_i = d$$

Pour les tronçons maritimes, $C_{si} = 0$.

3.2.3.3 *Affaiblissement total*

Etant donné que l'équation (4) exprimant $A$ en dB s'applique à l'affaiblissement en visibilité directe, l'affaiblissement total sera la somme de $A$ et:

– de l'affaiblissement en espace libre, en dB;

– de l'absorption gazeuse, en dB (voir le § 3.1).

* Il s'agit de la procédure actuellement recommandée. Toutefois, certaines données expérimentales conduisent à penser que l'affaiblissement supplémentaire, $A$, est indépendant de la fréquence et peut être représenté par l'expression:

$$A\ (\text{dB}) = 8\theta + 9\theta^2$$

où $\theta$ est exprimé en degrés et compris entre 0 et 1° [CCIR, 1974-78a].

Les administrations sont invitées à rechercher la formule qui convient le mieux dans ce cas.

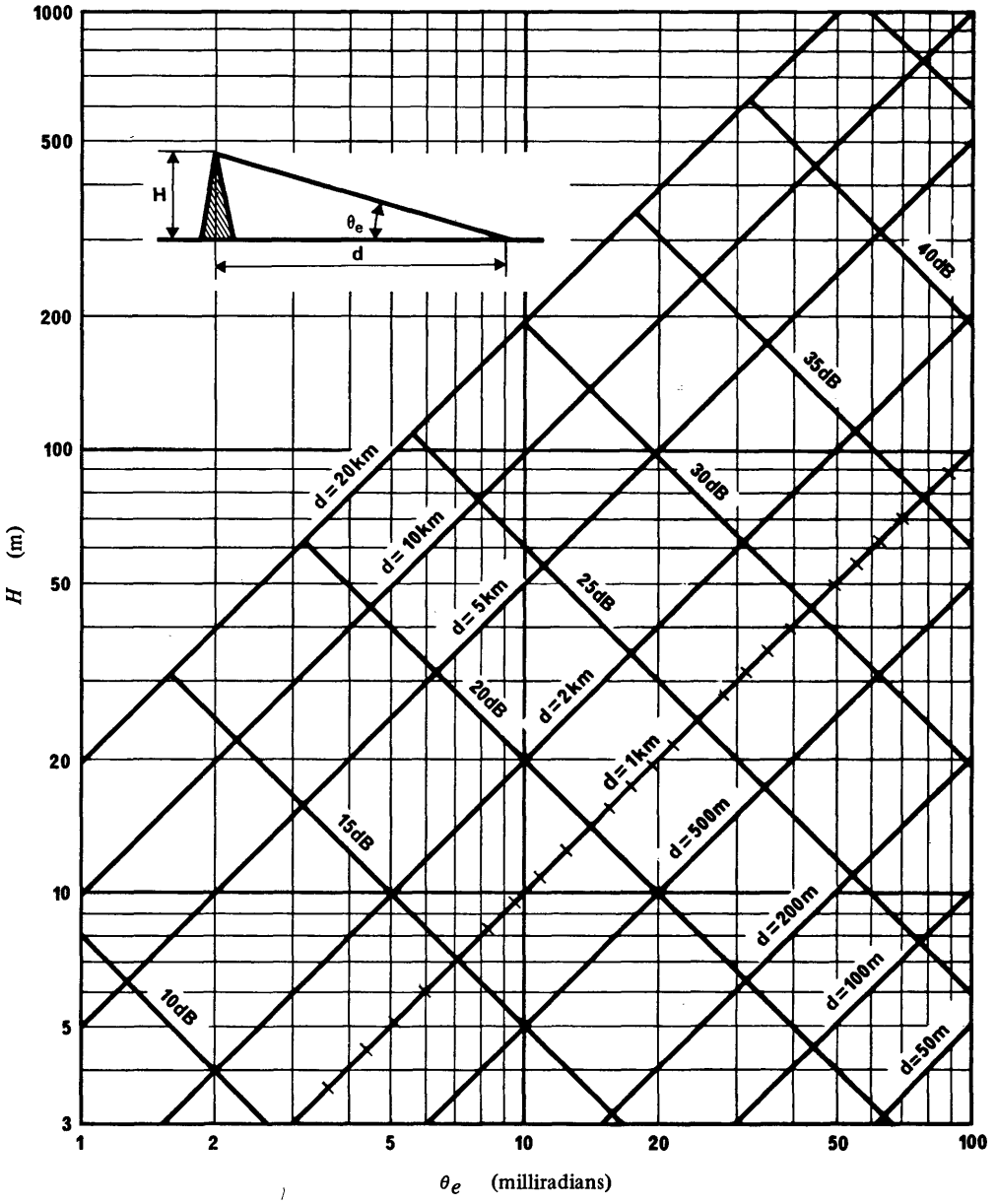



FIGURE 5 – *Diffraction sur une arête en lame de couteau (4 GHz)*

3.2.3.4 *Distances maximales de la propagation par conduits*

Les conduits ayant une longueur finie, la propagation par conduits comporte une distance de «coupure» définie. Au-delà de l'extrémité d'un conduit, l'affaiblissement de transmission augmentera si rapidement que l'on pourra considérer comme négligeable tout brouillage se produisant au-delà de cette distance; celle-ci dépend de la zone climatique et du pourcentage de temps pris en considération. On trouvera ci-après l'indication de distances de «coupure» pertinentes.

TABLEAU IV

| Zone | Pourcentage du temps | | |
|---|---|---|---|
| | 0,001 % | 0,01 % | 0,1 % |
| A | 800 km | 600 km | 400 km |
| B et C | 2000 km | 1500 km | 1200 km |

3.2.4 *Combinaison de plusieurs mécanismes*

Pour certains trajets, on peut être amené à considérer une combinaison de plusieurs des mécanismes précédents. Le cas le plus important est celui où le trajet franchit des arêtes de diffraction qui ne sont pas visibles l'une de l'autre ou d'une extrémité.

On évalue l'affaiblissement par rapport à l'affaiblissement en espace libre selon les indications données dans la section précédente, sans tenir compte de la présence d'un ou de plusieurs obstacles isolés, et on ajoute au résultat obtenu les valeurs appropriées de l'affaiblissement supplémentaire (dû à des arêtes en lame de couteau), obtenues selon la méthode indiquée dans le § 3.2.1, et les valeurs de l'affaiblissement supplémentaire dû à la partie du trajet qui n'est pas visible du sommet de l'obstacle; on peut obtenir ces dernières valeurs en se référant aux indications du § 3.2 ci-dessus.

## 4. Diffusion troposphérique vers l'avant

Dans le contexte du présent Rapport, on entend par propagation selon le mode de diffusion troposphérique vers l'avant celle qui résulte exclusivement d'une diffusion hétérogène due à des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Il s'ensuit que les signaux transmis au-delà de l'horizon sont plus intenses que ceux dus au simple phénomène de la diffraction, qui suit la surface courbe de la Terre. Ces signaux sont néanmoins beaucoup plus faibles que ceux qui résultent de formes de superréfraction, y compris le guidage; ce sont donc ces formes de superréfraction qui déterminent la force du signal dépassée pendant de petits pourcentages du temps et auxquelles sont dus les signaux brouilleurs par temps clair étudiés au § 3. Il importe de ne pas confondre lesdits signaux avec les signaux transmis selon le véritable mode de la diffusion troposphérique. Dans toutes les relations géométriques susceptibles de se produire, le plus intense des signaux transmis selon le véritable mode de la diffusion troposphérique est moins intense que les signaux brouilleurs dus à la diffusion par les hydrométéores. C'est le cas, dans la pratique, même pour la propagation dans le plan du grand cercle. On peut donc admettre que la possibilité de brouillage est déterminée soit par les mécanismes étudiés au § 3, soit par la diffusion par des hydrométéores examinée au § 5.

Il est donc inutile d'évaluer les champs créés par la diffusion troposphérique vraie. Ce qui précède vaut pour tous les diagrammes de directivité des antennes de station terrienne intéressées.

## 5. Diffusion par les hydrométéores

Pour les modes de propagation étudiés aux § 3 et 4, le signal est propagé vers l'avant dans le plan du grand cercle contenant l'émetteur et le récepteur. En revanche, la diffusion par les hydrométéores (y compris la pluie, la neige, la grêle et les nuages de glace) peut être considérée comme approximativement isotrope. Cela est particulièrement vrai dans le cas de la pluie, qui est d'ailleurs très souvent la principale source de diffusion par les hydrométéores. Cette diffusion peut s'intensifier dans la région de la couche de fusion (bande brillante), mais des considérations d'ordre géométrique montrent que la couche de fusion n'occupe, la plupart du temps, qu'une petite partie du volume commun aux deux faisceaux.

La diffusion par les hydrométéores peut causer un brouillage, même pour de grands angles de diffusion et lorsque les faisceaux d'antenne se coupent en dehors du plan du grand cercle. Bien que le principal problème soit celui du brouillage entre station terrienne et station de faisceaux hertziens de Terre, il convient aussi d'évaluer les possibilités de brouillage entre stations terriennes.

Plusieurs relations géométriques sont à envisager. Le premier cas est celui où de grandes parties des deux lobes principaux se coupent dans une zone d'orage et où peut se produire un couplage entre les faisceaux rayonnés par des stations séparées par de grandes distances (plusieurs centaines de kilomètres). Le second cas est celui où il y a quasi-intersection, ou encore couplage dans des intersections lobe principal/lobe latéral ou lobe latéral/lobe latéral. Dans ces conditions, les gains équivalents des antennes sont plus faibles et ce brouillage est donc perçu à de moindres distances. Finalement, sur de courtes distances, moins de 100 km par exemple, l'intersection d'un lobe principal et d'un lobe latéral éloigné dans une zone d'orage intense peut causer du brouillage.

Le tracé du trajet de brouillage dépend également des obstacles. Si un obstacle occulte partiellement ou complètement un lobe d'une antenne, le couplage brouilleur introduit par ce lobe sera partiellement ou complètement éliminé, sauf s'il se produit une diffraction. Bien entendu, ces obstacles ne se trouvent pas nécessairement dans le plan du grand cercle entre les stations.

Le présent Rapport se borne à exposer brièvement les modèles d'affaiblissement de transmission correspondant aux conditions pratiques d'exploitation. La référence [Crane, 1974] contient un exposé plus général sur l'analyse fondamentale et les notions radiométéorologiques utilisées. Il convient de souligner qu'il serait très difficile et fastidieux de faire une évaluation rigoureuse des effets de la diffusion due aux précipitations dans toutes les conditions possibles. Il faudrait, par exemple, connaître les diagrammes polaires des antennes, notamment les lobes latéraux, ainsi que l'intensité et la distribution spatiale des fortes pluies.

Les données relatives à ce dernier facteur sont encore extrêmement rares. Il faut donc faire plusieurs hypothèses fondamentales pour obtenir des résultats quantitatifs sous une forme commode et utilisable dans la pratique.

La suite de la présente section expose, en partant de ces hypothèses, la théorie de la diffusion par les hydrométéores.

5.1 *Etablissement des formules de l'affaiblissement de transmission*

Soit $L$ l'affaiblissement de transmission pour le couplage dû à la diffusion par la pluie; on a montré [Crane, 1974] que la formule suivante donne des résultats suffisamment exacts:

$$L = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_R} \right) = 10 \log \left( \frac{\lambda^2 \, 10^{17} \, r^2}{g_T \cdot D \cdot Z \cdot M} \right) \quad \text{dB} \tag{5}$$

où:

$P_R$: puissance reçue (W),

$P_T$: puissance émise (W),

$\lambda$: longueur d'onde (cm),

$g_T$, $D$, $Z$ et $M$: termes définis plus loin.

Si l'on tient compte des facteurs d'affaiblissement et du fait que la diffusion peut s'écarter de la loi de Rayleigh, on peut écrire comme suit la formule (6):

$$L = 199 + 20 \log r - 20 \log f - 10 \log Z + B - 10 \log M - 10 \log g_T + 10 \log A - 10 \log C - 10 \log D + r_o \gamma_o + r_w \gamma_w \quad \text{dB} \tag{6}$$

où:

$r$: distance de la station de Terre au volume de diffusion (km),

$f$: fréquence (GHz),

$10 \log Z = 26 + 14 \log R - f(h)$ (dB)

où:

$f(h)$: variation de la réflectivité en fonction de la hauteur donnée au § 3.1.1 du Rapport 724; (voir la Fig. 6 pour la géométrie du trajet soumis à la diffusion),

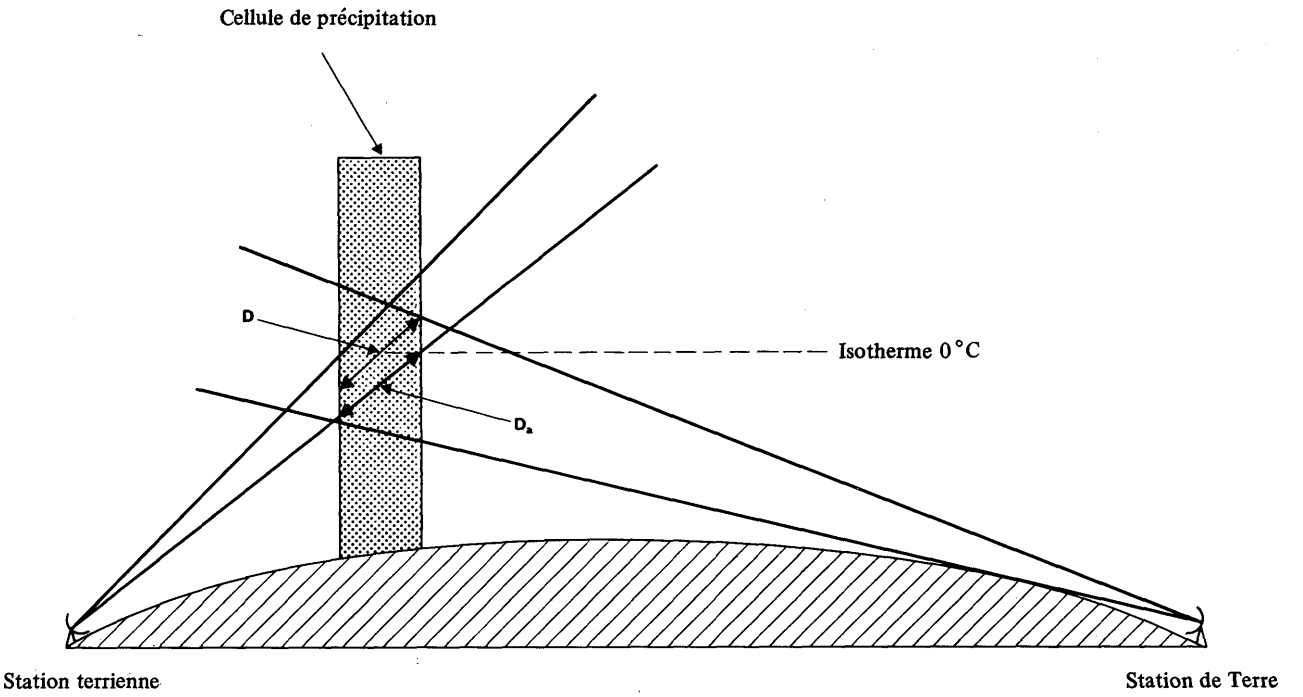



FIGURE 6 – *Représentation géométrique de la diffusion par les précipitations*

$R$: taux de précipitation (mm/h) donné dans la Fig. 11 du Rapport 563-1,

$r_h$: distance à l'horizon de la station de faisceaux hertziens de Terre (km),

$a$: rayon apparent normalisé, égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre (8500 km),

$Z$: facteur de réflectivité ($mm^6/m^3$);

$B$: facteur de blocage du terrain. Considérant que, dans le plan horizontal, l'angle d'ouverture du lobe principal de l'antenne de Terre est au moins égal à 1°, il embrassera au moins 400 m à la station de répéteurs la plus proche, qui est située à 25 km ou plus. On devra peut-être bien souvent tenir compte du fait que, au voisinage et au-delà de cette station de répéteurs, le terrain masquera jusqu'à la moitié de ce lobe, voire davantage, ce qui équivaut à une réduction de quelque 3 dB du couplage entre les deux faisceaux. Dans la formule (6) ci-dessus, cette diminution de gain est représentée par le facteur de blocage du terrain, $B$. Si une évaluation plus précise du brouillage est nécessaire, $B$ doit être déterminé sur la base de la géométrie pertinente;

$M$: facteur de désaccord de polarisation. Ce terme est introduit du fait que la polarisation du signal brouilleur diffusé peut différer de celle de l'antenne de réception. La relation entre ces deux polarisations est généralement complexe; elle dépend des polarisations respectives des antennes d'émission et de réception, de la forme des particules de diffusion et de la géométrie générale du système. Si un calcul préliminaire effectué en prenant $M = 1$ indique la possibilité d'un brouillage, on doit théoriquement pouvoir utiliser une valeur plus précise de $M$ en tenant compte des paramètres ci-dessus [Crane, 1974]. Il faut ici souligner un fait bien connu: la dépolarisation des ondes dans le cas de la diffusion par la pluie, aux fréquences considérées dans le problème étudié. Dans les systèmes conçus pour qu'un niveau donné de brouillage ne soit pas dépassé, il est peu probable qu'on puisse, avec une meilleure évaluation de $M$, arriver à une précision de l'ordre de 1 ou 2 dB. Il paraît donc prudent d'admettre simplement que $M = 1$.

10 log ($g_T$): gain de l'antenne de la station terrienne (dB),

10 log $A$: marge prévue pour écart de la diffusion par rapport à la loi de Rayleigh,

$$10 \log A = R^{0,4} \cdot 10^{-3} \left[ 4 (f - 10)^{1,6} \frac{1 + \cos \alpha}{2} + 5 \ (f - 10)^{1,7} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2} \right] \quad \text{dB}$$

pour 10 GHz $< f \leqslant$ 40 GHz

$10 \log A = 0$ dB pour $f \leqslant 10$ GHz

où:

$\alpha$: azimut de la station de Terre par rapport au faisceau de la station terrienne, mesuré à l'intersection des faisceaux,

10 log $C$: affaiblissement attribué à la pluie au-dessous de l'isotherme 0 °C,

$$10 \log C = -\gamma D_a \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} + 10 \log \left[ \frac{2{,}17}{\gamma D_a} \left( 1 - 10^{\frac{-\gamma D_a}{5}} \right) \right] \cdot \left( \frac{1 - \cos \alpha}{2} \right) \quad \text{dB}$$

où:

$\gamma$: affaiblissement linéique dû à la pluie (dB/km) (voir Rapport 721),

$D_a$: dimension équivalente de la cellule de précipitations le long du faisceau de la station terrienne et au-dessous de l'isotherme 0 °C (voir le § 5.1.1) (km),

$D$: dimension équivalente de la cellule de précipitations pour la diffusion (km),

$r_o$, $r_w$: longueurs du trajet équivalent d'absorption (km), respectivement pour l'oxygène et la vapeur d'eau, données par les Fig. 7 et 8 en fonction de la distance au sol et de l'angle de site du trajet,

$\gamma_o$, $\gamma_w$: coefficients d'absorption respectifs de l'oxygène et la vapeur d'eau (dB/km) tirés du Rapport 722.

*Note.* – $\gamma_{w0}$ est donné pour une teneur en vapeur d'eau ($\rho$) de 7,5 g/m$^3$ dans le Rapport 721. Lorsque l'on dispose de valeurs mesurées de cette teneur, il convient de les utiliser (les Fig. 9a et 9b indiquent des valeurs moyennes). Pour de petits pourcentages du temps, on pourra, faute d'autres données, utiliser la valeur $\rho$ donnée dans le Tableau IV du Rapport 724; on multipliera alors le coefficient $\gamma_{w0}$ par $\rho/7{,}5$ pour obtenir la valeur du coefficient $\gamma_w$.

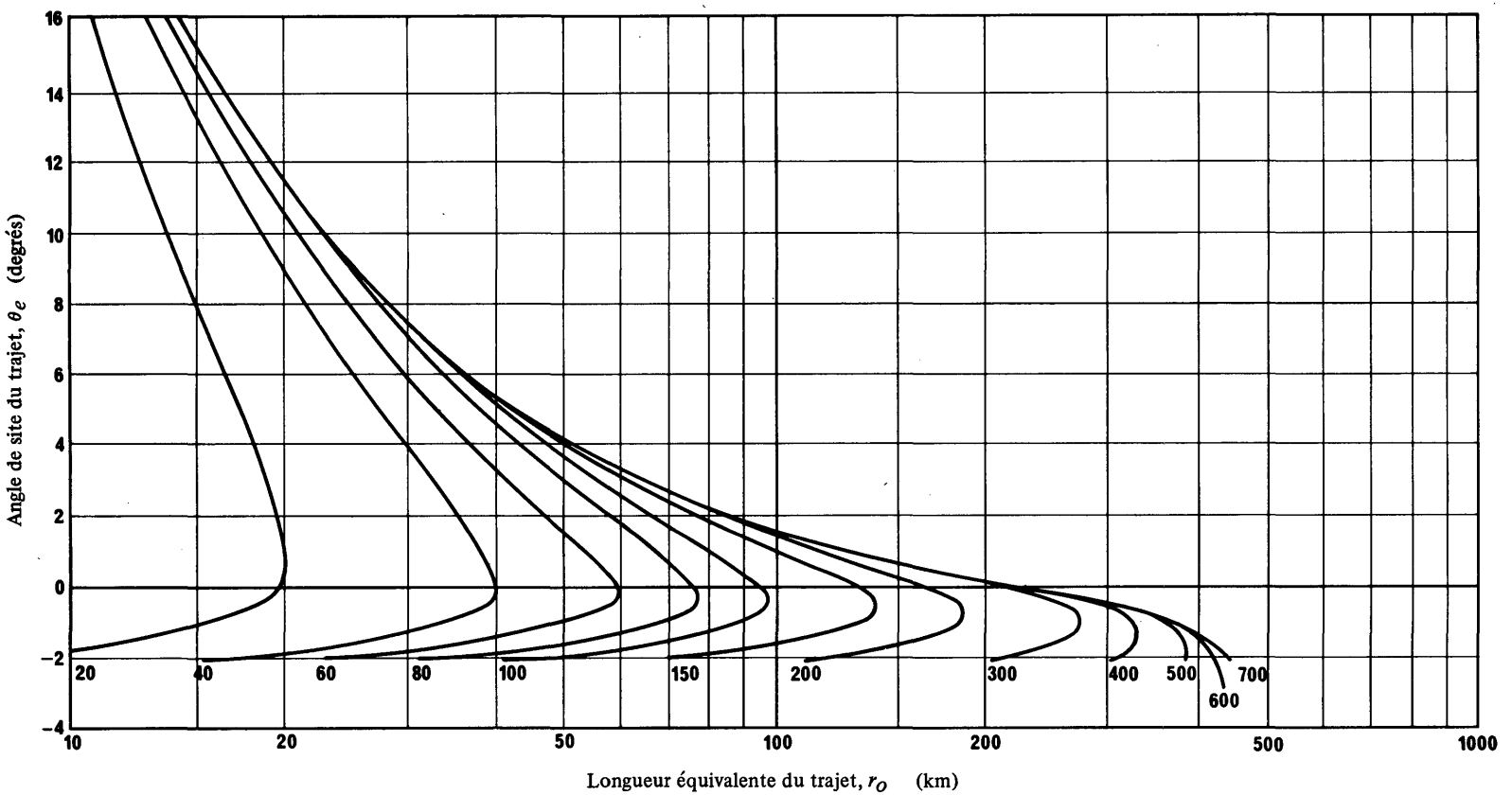



FIGURE 7 – *Longueur équivalente pour l'absorption par l'oxygène, $r_O$, pour les valeurs de la longueur du trajet, d (km), indiquées sur les courbes*

NOTE. – Ces courbes ne doivent pas être utilisées pour la propagation par des conduits atmosphériques dans lesquels l'onde serait sur toute la longueur du trajet sujette à l'absorption par l'oxygène.

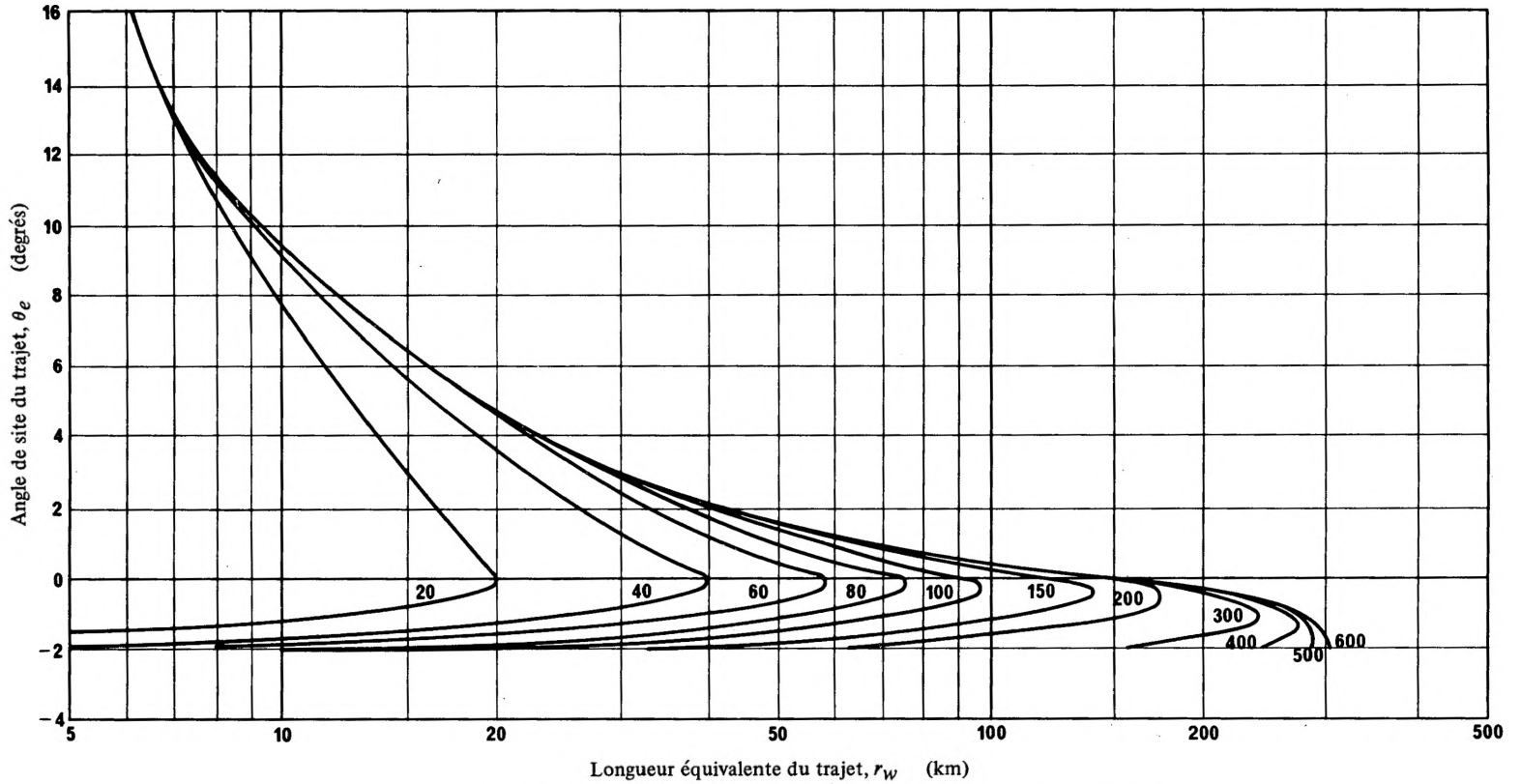



FIGURE 8 – *Longueur équivalente pour l'absorption par la vapeur d'eau, $r_W$, pour les valeurs de la longueur du trajet, d (km), indiquées sur les courbes*

NOTE. – Ces courbes ne doivent pas être utilisées pour la propagation par des conduits atmosphériques dans lesquels l'onde serait sur toute la longueur du trajet sujette à l'absorption par la vapeur d'eau.

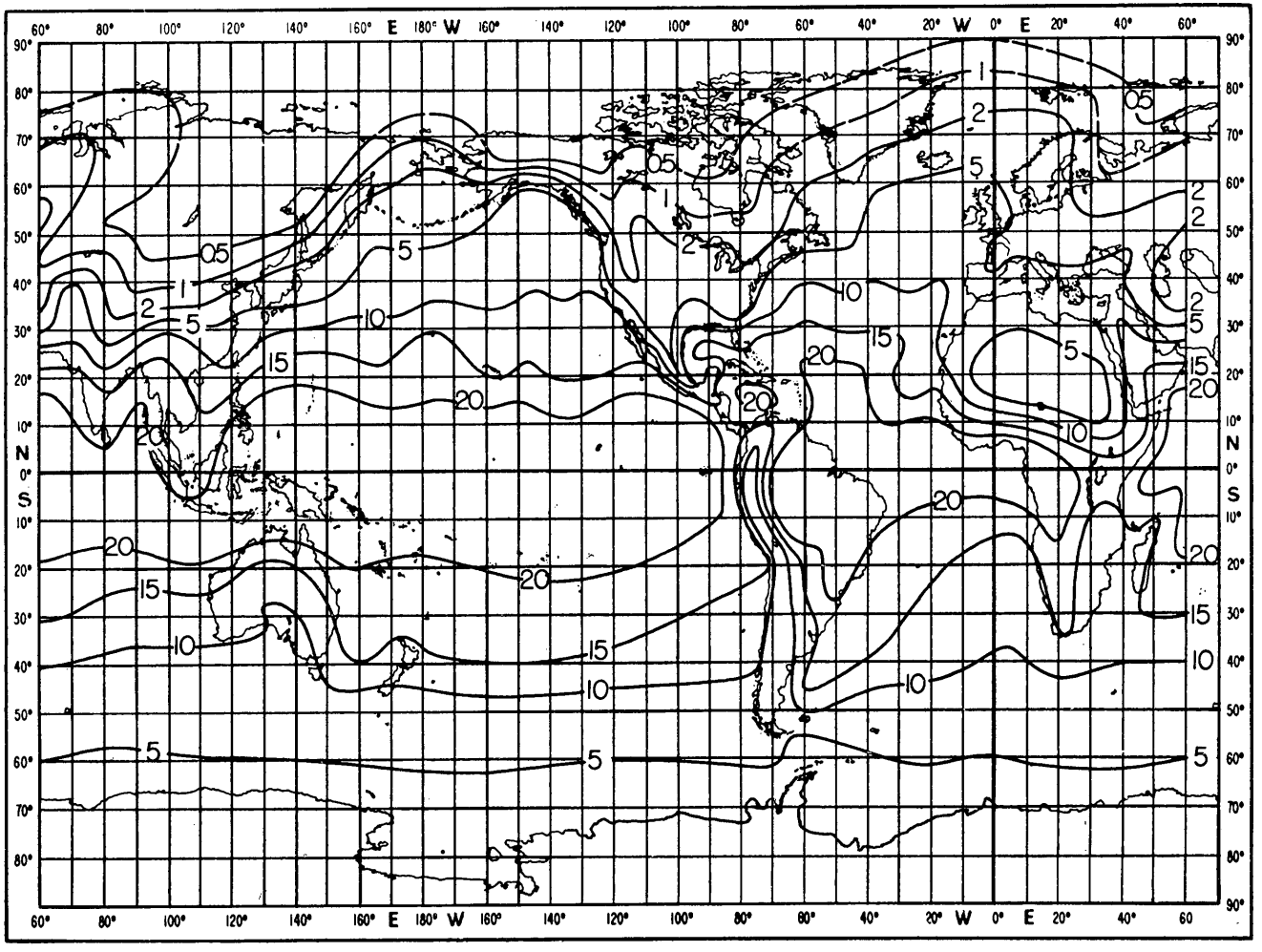



FIGURE 9*a* – *Humidité absolue moyenne (ou teneur en vapeur d'eau) (g/m³), février*

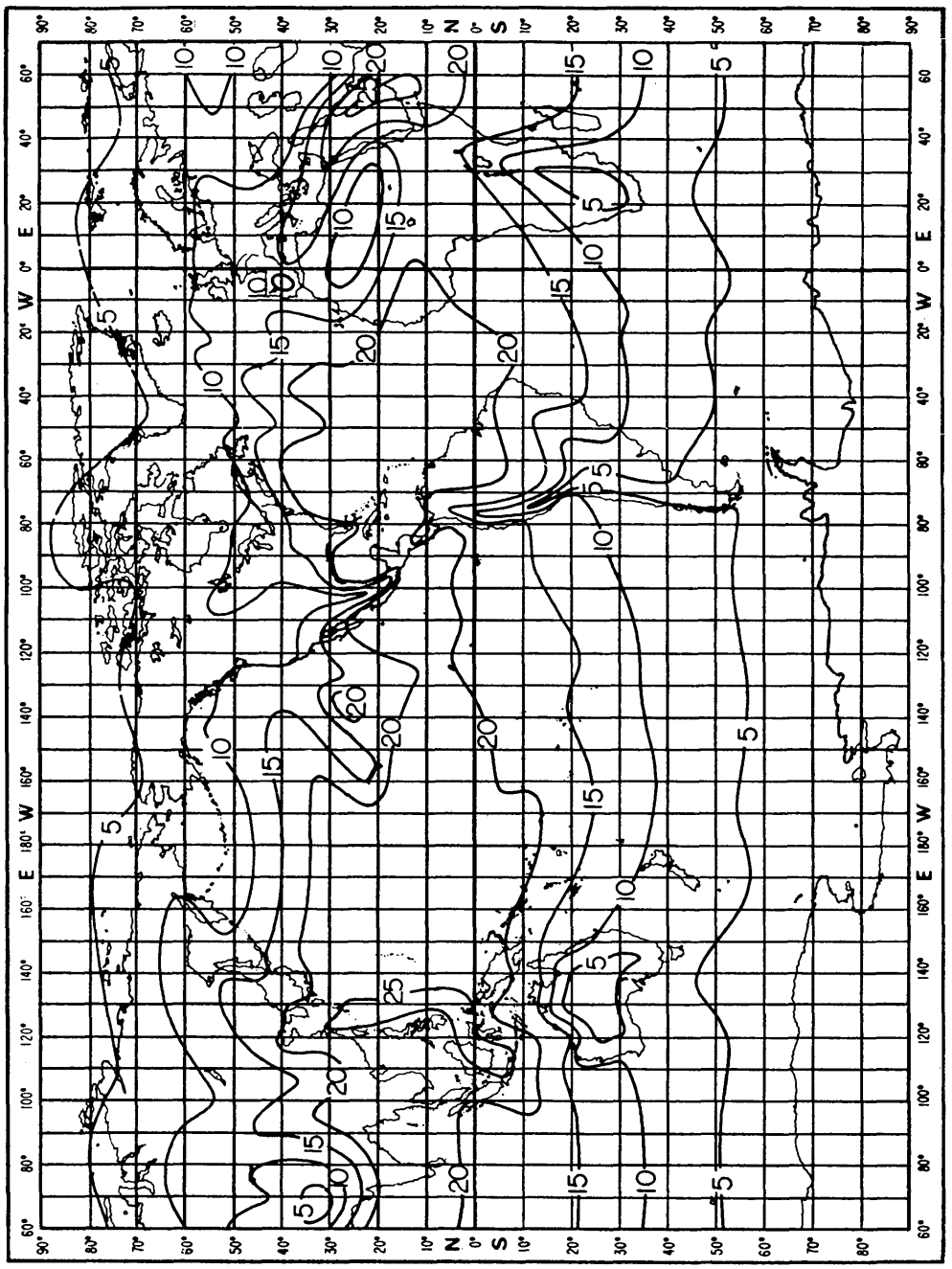


FIGURE 9b – *Humidité absolue moyenne (ou teneur en vapeur d'eau) (g/m³), août*

On peut calculer l'affaiblissement de transmission, *L*, pour le pourcentage du temps approprié en utilisant les paramètres ci-dessus.

*Note.* – Aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, et pour la diffusion vers l'avant ou une diffusion d'un mode voisin, l'affaiblissement de transmission du signal brouilleur à des taux de précipitation élevés peut dépasser l'affaiblissement à des taux inférieurs. En effet, à ces fréquences, l'affaiblissement augmente plus rapidement que la diffusion en fonction du taux des précipitations qui causent ces deux phénomènes. C'est pourquoi il est préférable de calculer l'affaiblissement de transmission dans le cas le plus défavorable (par exemple, pour des taux de précipitation pendant de plus grands pourcentages du temps que les pourcentages étudiés) lorsqu'il s'agit de cette gamme de fréquences.

5.1.1 *Détermination de la dimension effective du volume de pluie D*

On peut déterminer $D$ et $D_a$ d'après les données relatives à la géométrie des trajets et aux dimensions de la cellule, qui figurent dans le Rapport 563-1. Pour des pourcentages de temps égaux ou supérieurs à 0,1%, on peut admettre un remplissage du volume commun des faisceaux. Pour des pourcentages égaux ou inférieurs à 0,01%, il convient d'utiliser les données pertinentes portant sur les dimensions des cellules. Pour l'intersection des lobes principaux,

$$D = \frac{D_x}{\sin \theta_e}$$

où $D_x$ est l'ouverture linéaire du lobe principal de l'antenne de la station de Terre dans le volume de diffusion et $\theta_e$ est l'angle de site du lobe principal de la station terrienne.

5.2 *Intersection du lobe principal de l'antenne d'une station terrienne et du premier lobe latéral de l'antenne d'une station de Terre*

Si l'on considère que le premier lobe latéral de l'antenne de la station de Terre est un anneau entourant le lobe principal, il est possible d'évaluer l'affaiblissement de transmission dans les cas de quasi-intersection. Lorsqu'on fait varier légèrement l'azimut du faisceau de l'antenne de Terre par rapport à l'intersection, l'affaiblissement de transmission augmente d'abord brusquement au moment où les lobes principaux se séparent, puis l'effet du premier lobe latéral devient prédominant. Cela se produit lorsqu'on déplace le faisceau de 2,5° à 3°. Les calculs peuvent être faits dans ces conditions, pour un trajet traversant une pluie d'orage, de la même façon que les calculs relatifs aux intersections des lobes principaux. On peut résumer les résultats en disant que, pour une courbe d'affaiblissement de transmission donnée s'appliquant au cas d'intersection des lobes principaux, on observe un affaiblissement supplémentaire compris entre 10 et 23 dB selon le tracé du trajet. Dans la plupart des cas, cette valeur est comprise entre 16 et 19 dB.

5.3 *Brouillage introduit par les lobes latéraux extrêmes de l'une des antennes*

Si la séparation des faisceaux des antennes de la station terrienne et de la station de Terre dépasse les valeurs indiquées au § 5.2, il faut évaluer l'effet du rayonnement des lobes latéraux extrêmes. Pour un calcul approché, en supposant que le rayonnement des lobes extrêmes de l'antenne de la station de Terre équivaut (dans la direction de la station terrienne) au rayonnement d'une antenne isotrope, on peut trouver l'affaiblissement de transmission d'après l'équation (6) avec $g_T = 1$ et $M = 1$.

L'équation (6) est applicable à l'évaluation du brouillage en ce qui concerne les services de Terre et les trajets montants de tous les services spatiaux, ainsi qu'à l'évaluation du brouillage entre trajets montants.

5.4 *Mesures effectuées*

Des mesures récentes faites pendant une année dans l'est des Etats-Unis d'Amérique ont montré qu'en cas d'intersection des lobes principaux des antennes d'une station terrienne et d'une station de Terre séparées par une distance de 50 à 80 km, les valeurs expérimentales de l'affaiblissement concordent avec les valeurs prévues d'après les taux de précipitation en surface, pour un volume de diffusion situé à une hauteur de 3 km. Pour un volume de diffusion situé à 6 km, les prévisions tendent à sous-estimer l'affaiblissement pendant 0,01% de l'année. D'autres observations montrent que, pour les fréquences inférieures à 8 GHz, on a le droit d'admettre par hypothèse que la diffusion suit la loi de Rayleigh et que les effets de l'absorption sont négligeables [Crane, 1974].

Des mesures analogues, à 12,3 GHz, effectuées en République fédérale d'Allemagne sur une période de trois ans, avec un volume commun des lobes principaux à une hauteur de 1 à 3 km, ont révélé une concordance satisfaisante entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées de l'affaiblissement de transmission pendant 0,01% du temps [CCIR, 1974-78b].

5.5 *Conclusions générales*

Le cas le plus gênant est celui de l'intersection des lobes principaux dans une cellule de pluie orageuse. Dans la gamme des fréquences comprises entre 4 et 10 GHz, l'affaiblissement supplémentaire dû à une élévation de la fréquence, dans le cas d'une pluie d'orage, est approximativement égal à la diminution de l'affaiblissement due à la variation de la diffusion en fonction de la fréquence. Avec des fortes pluies à cellules étendues, l'effet de l'absorption domine au-dessus de 10 GHz, notamment pour la diffusion vers l'avant, de sorte que le brouillage dû à la diffusion par les précipitations devient moins grave.

En cas d'intersection du lobe principal de l'antenne d'une station terrienne et du premier lobe latéral de l'antenne d'une station de Terre (c'est-à-dire lorsque le faisceau de cette dernière est écarté d'environ 3° par rapport à l'intersection exacte), l'affaiblissement dû à une pluie d'orage augmente d'environ 18 dB dans la plupart des cas, par rapport aux valeurs observées lorsqu'il y a intersection des lobes principaux.

On risque d'observer un brouillage inadmissible dû à la diffusion par les précipitations à l'intersection du lobe principal de l'antenne d'une station terrienne avec les lobes latéraux extrêmes de l'antenne d'une station brouilleuse. Ce problème nécessite des études complémentaires, compte tenu des propositions actuelles concernant les services qui fonctionnent dans des bandes partagées.

## 6. Effet de l'affaiblissement dans l'atmosphère sur le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales (c'est-à-dire avec un signal brouilleur traversant un trajet oblique dans toute l'atmosphère)

Si l'on considère le brouillage entre stations de Terre et stations spatiales, les valeurs de l'affaiblissement de transmission par temps clair (valeurs non dépassées pendant de faibles pourcentages du temps) prennent une grande importance. Cet affaiblissement est dû essentiellement à l'absorption par l'oxygène et la vapeur d'eau, mais la défocalisation, ou étalement du faisceau, augmente beaucoup l'affaiblissement aux petits angles de site. Pour des angles de site inférieurs à 5° et pour des pourcentages de temps inférieurs à 1%, il faut tenir compte des effets de la scintillation troposphérique.

Il convient de noter que, pour une station spatiale située dans une direction proche de celle de l'horizon normal d'une station de Terre, une augmentation de la réfraction dans l'atmosphère inférieure risque d'étendre sensiblement la zone de la surface terrestre où peuvent se produire des brouillages mutuels entre systèmes.

La quantité dont l'affaiblissement de transmission total dépasse l'affaiblissement en espace libre par temps clair peut s'exprimer comme suit:

$$\gamma_{o0}\ r_{eo} + \frac{\rho}{7{,}5}\ \gamma_{w0}\ r_{ew} + A_D + S \qquad \text{dB} \qquad (7)$$

où:

$\gamma_{o0}$, $\gamma_{w0}$: coefficients d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau déterminés à la surface de la Terre. Dans le Rapport 719, $\gamma_{o0}$ et $\gamma_{w0}$ sont représentés en fonction de la fréquence. Il convient de noter que $\gamma_{w0}$ correspond à une atmosphère dont la teneur en vapeur d'eau est de 7,5 g/m$^3$. Il en résulte le facteur $\rho/7{,}5$ dans l'expression (7) ci-dessus.

$r_{eo}$, $r_{ew}$: 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.

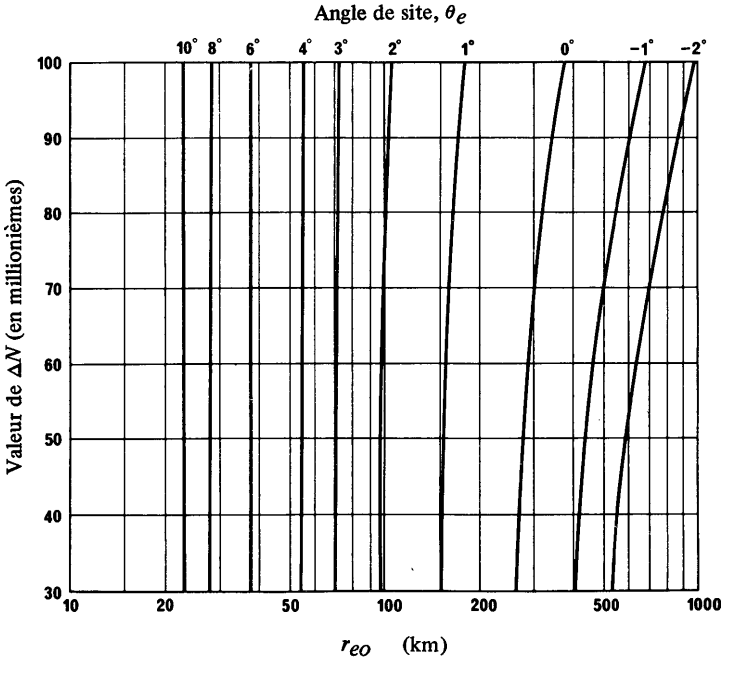



FIGURE 10*a* – *Distance équivalente $r_{eo}$ pour évaluer l'absorption due à l'oxygène*

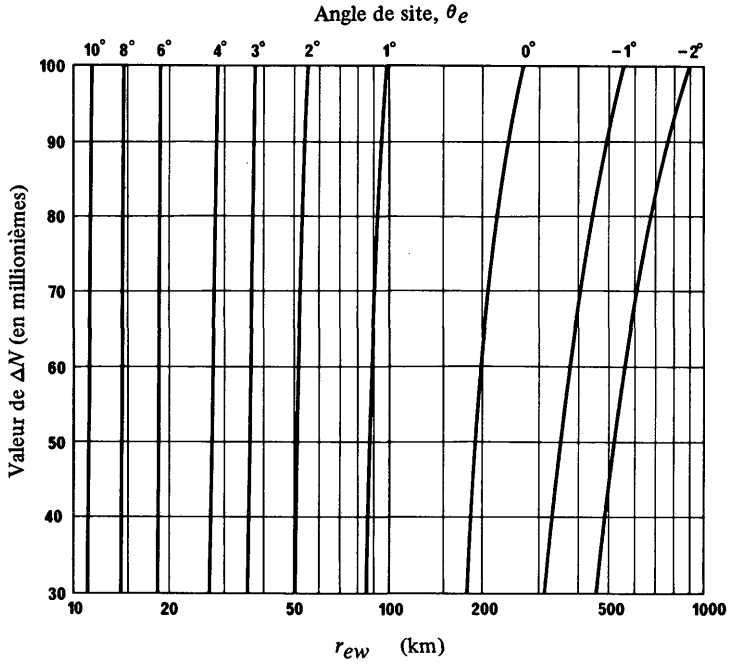



FIGURE 10*b* – *Distance équivalente $r_{ew}$ pour évaluer l'absorption due à la vapeur d'eau*

Sur les Fig. 10a et 10b, $r_{eo}$ et $r_{ew}$ sont indiqués en fonction de l'angle de site $\theta_e$ et de la valeur de $\Delta N$. Dans ce cas, $\theta_e$ est l'angle d'arrivée, dans le plan vertical de la station de Terre, du trajet radioélectrique provenant de la station spatiale et non pas l'angle de site géométrique réel de la station spatiale. La relation entre ces deux angles dépend de la réfraction de l'atmosphère. On trouvera, aux Fig. 4 à 7 du Rapport 563-1, des cartes mondiales des moyennes mensuelles de $\Delta N$.

$\rho$: est la teneur en vapeur d'eau en g/m$^3$ (Fig. 9a et 9b).

$A_D$: est l'affaiblissement dû à la défocalisation ou étalement du faisceau (Fig. 11).

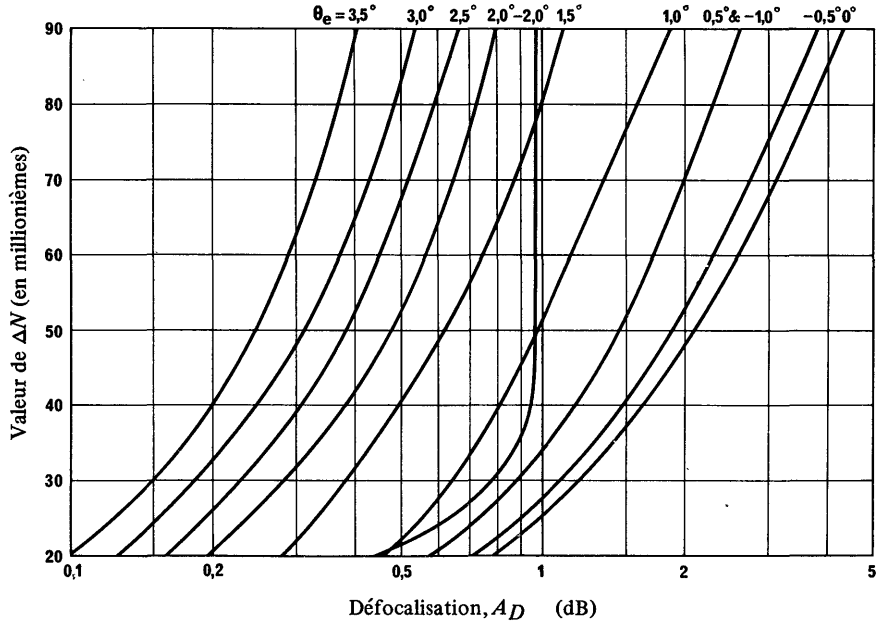



FIGURE 11 – *Défocalisation des ondes radioélectriques à propagation quasi horizontale*

*S*: est l'affaiblissement (ou gain) dû à la scintillation. On peut supposer que *S* est égal à zéro pour les angles de site supérieurs à 5° et pour les pourcentages de temps supérieurs à 1% (Rapport 718, § 3). Pour les petits angles de site et les faibles pourcentages de temps, la scintillation peut causer un affaiblissement de transmission inférieur à l'affaiblissement en espace libre. On peut déduire de l'interprétation de certaines mesures que la scintillation est susceptible de diminuer l'affaiblissement de transmission d'une valeur pouvant aller jusqu'à 6 dB, aux angles de site compris entre 1 et 2°, pendant un pourcentage du temps ne dépassant pas 1%, à 7 GHz.

Les valeurs moyennes de ρ pour les mois de février et d'août ont été calculées [Bean et Dutton, 1966]; pour plus de commodité, ces valeurs sont reportées sur les Fig. 9a et 9b. En première approximation, on peut supposer que les données statistiques des variations temporelles de ρ ont une distribution gaussienne avec un écart type, σ, égal à environ 0,25 fois la valeur moyenne de ρ. Par exemple, l'humidité absolue probablement dépassée pendant 99% du temps serait de 1 − (0,25 × 2,4) = 0,4 fois la valeur moyenne. De même, la valeur dépassée pendant 99,99% du temps serait de 1 − (0,25 × 3,8) = 0,05 fois la valeur moyenne.

En supposant que la défocalisation (ou étalement) du faisceau soit limitée au plan vertical, on a alors, pour un angle de site $\theta_e$, l'expression suivante:

$$A_D = 10 \log \left(1 - \frac{d_\tau}{d\theta_e}\right) \quad (8)$$

dans laquelle τ est la réfraction atmosphérique.

Sur la Fig. 11, $A_D$ est représenté en fonction de $\theta_e$ et de $\Delta N$.

## RÉSUMÉ DE LA PROCÉDURE

### A. Trajet dans le plan du grand cercle

On trouvera ci-après un résumé indiquant comment il convient d'utiliser les informations données dans le présent Rapport en vue d'aider l'ingénieur, dans l'estimation de l'affaiblissement pour évaluer le brouillage.

1. Déterminer le tracé du trajet équivalent dans le plan du grand cercle dans les conditions de référence à long terme, en utilisant les indications du § 2.2.1. Lorsqu'il ne semble pas possible de classer nettement le trajet en fonction des modèles donnés au § 2.2.1, il peut être nécessaire d'évaluer le brouillage associé à la propagation de surface, pour les deux modèles correspondant le plus étroitement possible aux caractéristiques du trajet réel, puis de choisir celui pour lequel l'affaiblissement de transmission est le moins élevé.

2. Pour chacun des types de trajet décrits au § 2.2.1, calculer l'affaiblissement de la façon suivante:

2.1 *Trajet a)*

Utiliser les informations données au § 3.1 pour 20% du temps et pour les petits pourcentages du temps.

2.2 *Trajet b)*

Utiliser les informations données dans le § 3.2.1.

2.3 *Trajet c)*

Utiliser les informations données dans le § 3.2.2 pour déterminer l'affaiblissement de transmission pendant 20% du temps, et les informations données dans le § 3.2.4 pour les petits pourcentages du temps. Utiliser de plus les informations du § 4 et retenir l'affaiblissement le plus petit ainsi obtenu.

2.4 *Trajet d)*

Utiliser les informations données dans les § 3.2.2 et 3.2.4 et retenir l'affaiblissement le plus petit pendant 50% du temps. Calculer alors l'affaiblissement à 20% pour le mécanisme qui a donné l'affaiblissement le plus petit à 50%. Pour les petits pourcentages de temps, utiliser les informations du § 4 dans lequel $L_{50}$ représente la valeur de l'affaiblissement à 50% retenu ci-dessus.

2.5 *Trajet e)*

Procéder comme pour le trajet de type *d)* pour les affaiblissements à 20% du temps. Pour les petits pourcentages du temps, utiliser les informations du § 3.2.3.

### B. Trajets hors du plan du grand cercle (diffusion par les précipitations)

1. Utiliser les données pluviométriques locales ou, lorsqu'elles ne sont pas disponibles, les courbes de la Fig. 13 du Rapport 563-1 pour déterminer: *a)* la valeur du taux de précipitation en surface dépassée pendant le pourcentage de temps considéré (0,01% par exemple); *b)* si ce taux s'applique à des pluies à cellules étendues ou à des pluies d'orage; et *c)* dans ce dernier cas, l'altitude de coupure correspondante.

2. En ce qui concerne le tracé du trajet, déterminer si les lobes principaux des antennes des deux stations se coupent ou non et, dans l'affirmative, à quel endroit.

3. Compte tenu du tracé du trajet, il convient d'appliquer les paragraphes indiqués ci-après pour déterminer l'affaiblissement de transmission en fonction des différents types possibles d'intersection des faisceaux:

*a)* intersection de lobes principaux: § 5.1;

*b)* intersection d'un lobe principal avec un premier lobe latéral: § 5.2;

*c)* intersection d'un premier lobe latéral avec un premier lobe latéral: § 5.2;

*d)* intersection avec des lobes latéraux extrêmes: § 5.3.

### C. Brouillage entre stations de Terre et stations spatiales

Utiliser les données énoncées au § 6.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio meteorology.* Monographie de la NBS N° 92, US Government Printing Office.
CRANE, R. K. [1974] Bistatic scatter from rain. *IEEE Trans.*, Vol. AP-22.

BIBLIOGRAPHIE

MISME, P. [1974] Affaiblissement de transmission en propagation guidée atmosphérique. *Ann. des télécomm.*, 3-4.

*Documents du CCIR*
[1974-78]: **a.** 5/217 (France); **b.** 5/255 (Allemagne (République fédérale d')).

---

## RAPPORT 724 *

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES A L'ÉVALUATION DE LA DISTANCE DE COORDINATION DANS LA GAMME DE FRÉQUENCES DE 1 A 40 GHz

(Programme d'études 5D-3/5)

(1978)

### 1. Introduction

1.1 On trouvera dans ce Rapport la description d'une méthode simple, résultant d'une simplification et d'un regroupement des données contenues dans le Rapport 569-1, pour l'évaluation des facteurs de propagation qui interviennent dans la détermination des distances de coordination. Si l'application de cette méthode révèle la possibilité de difficultés en matière de coordination, il faudra faire l'évaluation comme indiqué dans le Rapport 569-1.

Pour déterminer les caractéristiques de la propagation nécessaires à l'évaluation de la distance de coordination relative à une station terrienne, on part ici des hypothèses suivantes:

- les emplacements des stations de Terre avec lesquelles la coordination doit être faite ne sont pas connus;
- concernant les relations géométriques du trajet de brouillage, on ne possède de renseignements que sur la station terrienne;
- concernant les relations géométriques pour le reste du trajet de brouillage, il faut faire des hypothèses limitatives prudentes, comme indiqué dans le texte qui suit;
- le diagramme de rayonnement de l'antenne de la station terrienne a pour expression $G = 32 - 25 \log \psi$; $G$ est le gain, en décibels, par rapport à une antenne isotrope et $\psi$ est l'angle, en degrés, formé par l'axe du lobe principal et la direction considérée. **

1.2 En raison du risque d'erreur dans la prévision de l'affaiblissement de transmission, sur de courtes distances, lorsqu'on ignore la structure géométrique exacte du trajet, on considère dans tous les cas que la distance de coordination minimale est de 100 km.

1.3 Dans le présent Rapport, les phénomènes de propagation sont classés en deux modes:

- mode A: phénomènes de propagation par temps clair, influencés par la présence de la surface terrestre (diffraction, réfraction, propagation guidée). Ces phénomènes intéressent uniquement la propagation dans le plan du grand cercle;
- mode B: diffusion par la pluie; *** cette propagation ne se fait pas uniquement dans le plan du grand cercle.

Les modes A et B sont illustrés par la Fig. 1.

1.4 Pour chaque azimut à partir de la station terrienne et pour chacun de ces deux modes de propagation, il faut déterminer une distance correspondant à l'affaiblissement de transmission requis. La plus grande des deux distances ainsi obtenues est prise comme distance de référence pour l'azimut considéré.

### 2. Mode A: Mécanismes de propagation dans le plan du grand cercle

2.1 On suppose que le terrain est assez plat (le coefficient $\Delta H$, qui caractérise les irrégularités du sol décrites dans le Rapport 569-1 a été pris égal à 25 m).

---

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10 et 11.

** Voir l'Avis 465-1.

*** La diffusion par la pluie est la forme la plus fréquente de la diffusion par les précipitations, dans le contexte du problème considéré ici.

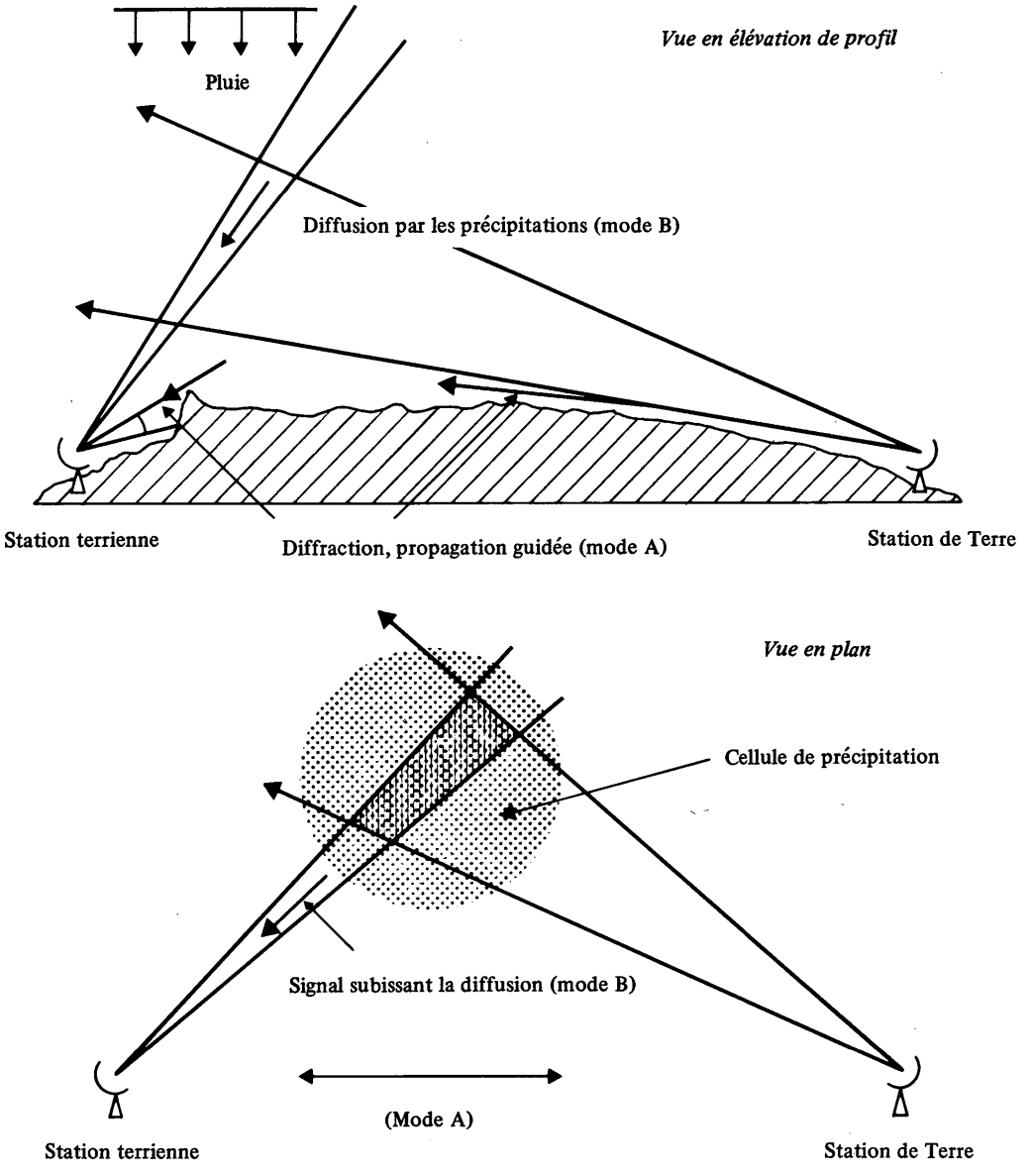



FIGURE 1 – *Modes de propagation*
*Vues en élévation et en plan des modes de propagation A et B*

2.2 Pour faire ce calcul, on considère que la Terre est divisée en trois zones géographiques:

zone A: terres;

zone B: mers, océans et autres vastes étendues d'eau (le critère est le suivant: ces étendues ne doivent pas couvrir moins de 100 km dans la direction de l'azimut ni moins de 100 km perpendiculairement à cette direction), à des latitudes supérieures à 23,5° N ou S, à l'exception de la mer Noire et de la Méditerranée;

zone C: mers, océans et autres vastes étendues d'eau (le critère est le suivant: ces étendues ne doivent pas couvrir moins de 100 km dans la direction de l'azimut ni moins de 100 km perpendiculairement à cette direction), à des latitudes inférieures à 23,5° N ou S, y compris la mer Noire et la Méditerranée.

2.3 Pour le mode A, l'affaiblissement total du trajet $A$ (dB) a pour expression:

$$A = A_0 + \gamma_t \cdot d_t + \gamma_m \cdot d_m + \gamma_o(d_t + d_m) + \gamma_{vt} \cdot d_t + \gamma_{vm} \cdot d_m + A_s \quad \text{dB} \tag{1}$$

$A_0$ terme dépendant de la fréquence; en première approximation, on a:

$$A_0 = 120 + 20 \log f \quad \text{dB} \tag{2}$$

$d_t$, $d_m$: longueurs des parties respectivement terrestre et maritime du trajet (km);

$\gamma_t$, $\gamma_m$: affaiblissements linéiques normalisés (dB/km) des parties respectivement terrestre et maritime du trajet (non compris les affaiblissements dus à l'oxygène et à la vapeur d'eau), exprimés par:

$$\gamma_m = (0{,}366 + 0{,}047 \log p)^2 \quad \text{(dB/km)} \tag{3}$$

$$\gamma_t = 0{,}154\,(1 + 3{,}05 \log f)^{0{,}4} \cdot (1 + 0{,}0486 \log p)^2 \quad \text{(dB/km)} \tag{4}$$

$f$: fréquence (GHz);

$p$: fraction du temps pendant laquelle l'affaiblissement du trajet n'est pas dépassé (par exemple, $p = 10^{-4}$ correspond à 0,01% du temps);

$\gamma_o$: affaiblissement linéique (dB/km) dû à l'absorption par l'oxygène, exprimé par:

$$\gamma_o = 68 \cdot 10^{-4} f^2 \left[\frac{1}{(60 - f)^2} + \frac{1}{(60 + f)^2} + \frac{1}{(f^2 + 0{,}36)}\right] \quad \text{(dB/km)} \tag{5}$$

$\gamma_{vt}$, $\gamma_{vm}$: affaiblissements linéiques (dB/km) dus à la vapeur d'eau sur les parties respectivement terrestre et maritime du trajet, basés sur les valeurs suivantes de $\rho$ (teneur de l'air en vapeur d'eau ($g/m^3$)):

zone A: $\rho = 1$
zone B: $\rho = 2$
zone C: $\rho = 5$

On utilise l'expression suivante pour l'affaiblissement linéique dû à la vapeur d'eau, $\gamma_v$:

$$\gamma_v = 3{,}5 \cdot 10^{-4} \rho \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{22{,}3}{f}\right)^2 + \frac{9}{f^2}} + \frac{1}{\left(1 + \frac{22{,}3}{f}\right)^2}\right] + 3 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot f^2 \quad \text{(dB/km)} \tag{6}$$

($\gamma_v$ peut être négligé lorsque $f < 15$ GHz)

$A_s$: affaiblissement supplémentaire dû à l'angle de site de l'horizon; pour un angle de site négatif, tout se passe comme si l'affaiblissement total était diminué, car $A_s$ prend une valeur négative. L'angle de site de l'horizon, $\theta$, étant exprimé en degrés, l'affaiblissement $A_s$ prend les valeurs suivantes (dB):

$$\left.\begin{aligned} A_s &= 20 \log (1 + 2{,}6 f^{1/2} \cdot \theta) && \text{si } \theta > 0 \\ A_s &= 8\,\theta && \text{si } -0{,}5 < \theta < 0 \\ A_s &= -4 && \text{si } \theta < -0{,}5 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

L'expérience acquise avec les conduits qui se forment effectivement montre que les distances de coordination prévisibles pour le mode A ne doivent pas dépasser les limites indiquées dans le Tableau I.

TABLEAU I – *Distances limites des conduits*

| Zone | Pourcentage du temps | | |
|---|---|---|---|
| | 0,001 | 0,01 | 0,1 |
| A (km) | 800 | 600 | 400 |
| B et C (km) | 2000 | 1500 | 1200 |

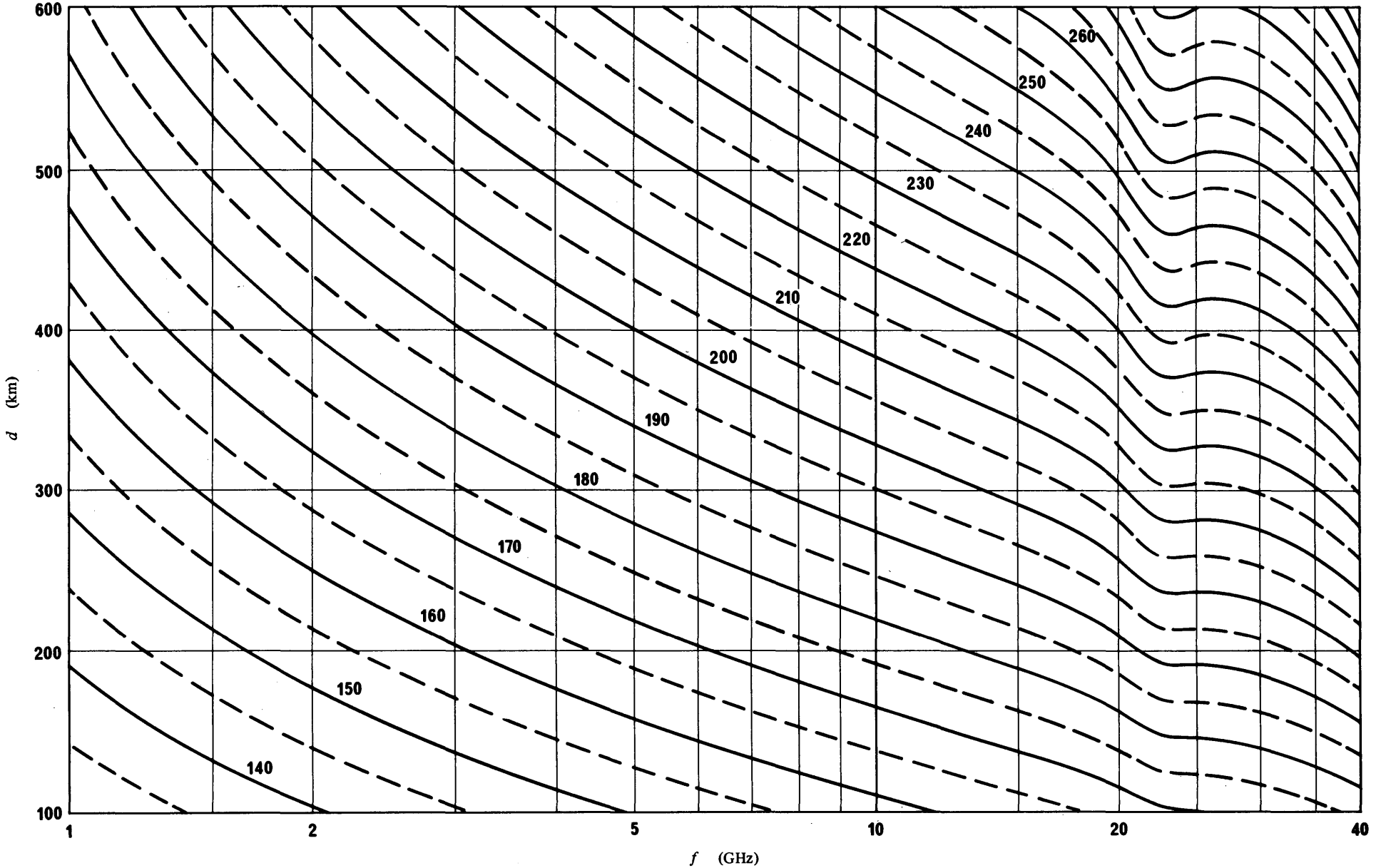



FIGURE 2 – *Affaiblissement de transmission $A - A_S$ (dB) en fonction de la distance dans la zone A pendant 0,01% du temps*

(valeurs indiquées sur les courbes en dB ; gamme de fréquences de 1 à 40 GHz)

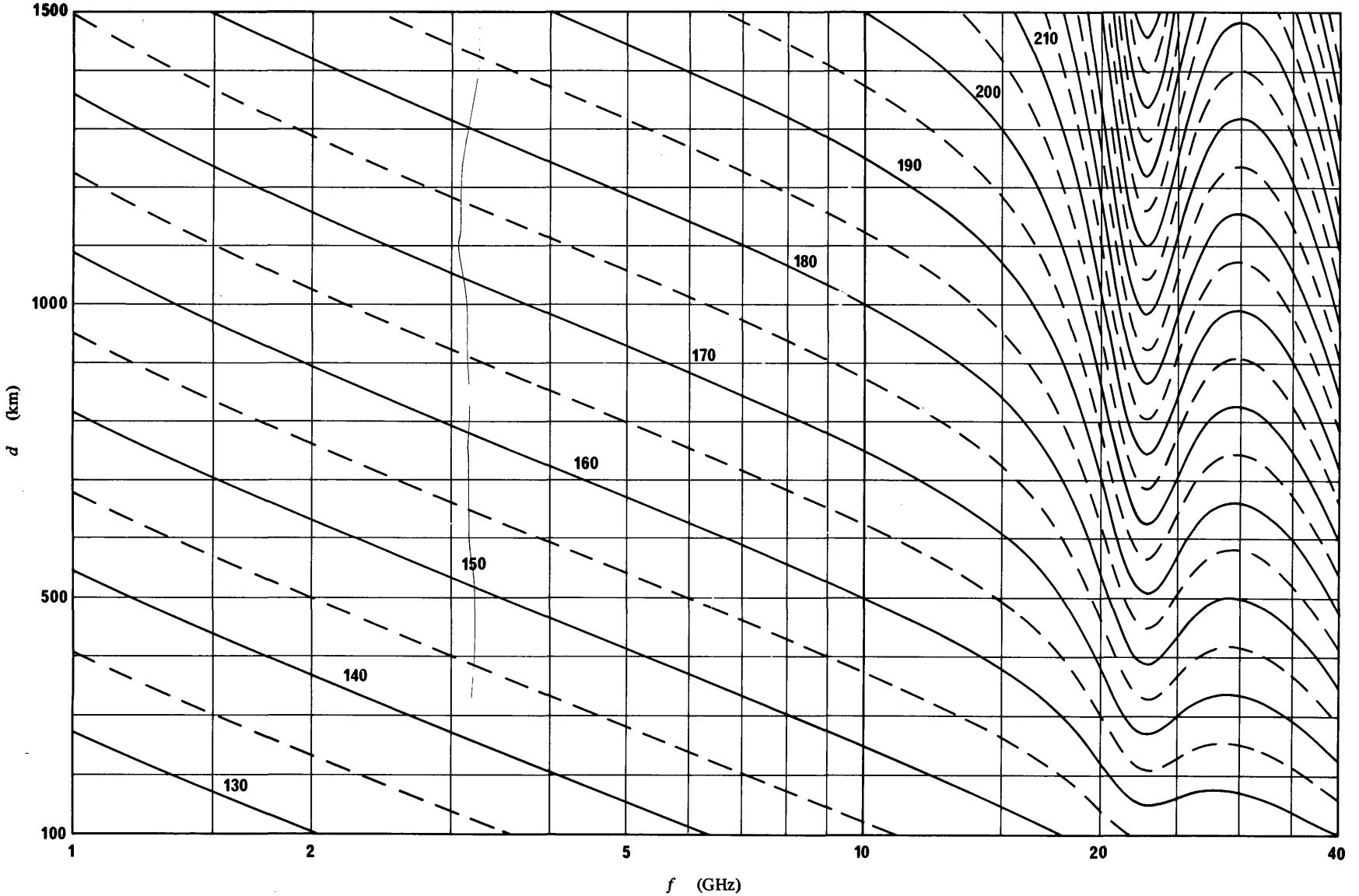



FIGURE 3 – *Affaiblissement de transmission A (dB) en fonction de la distance dans la zone B pendant 0,01% du temps*
(valeurs indiquées sur les courbes en dB ; gamme de fréquences de 1 à 40 GHz)

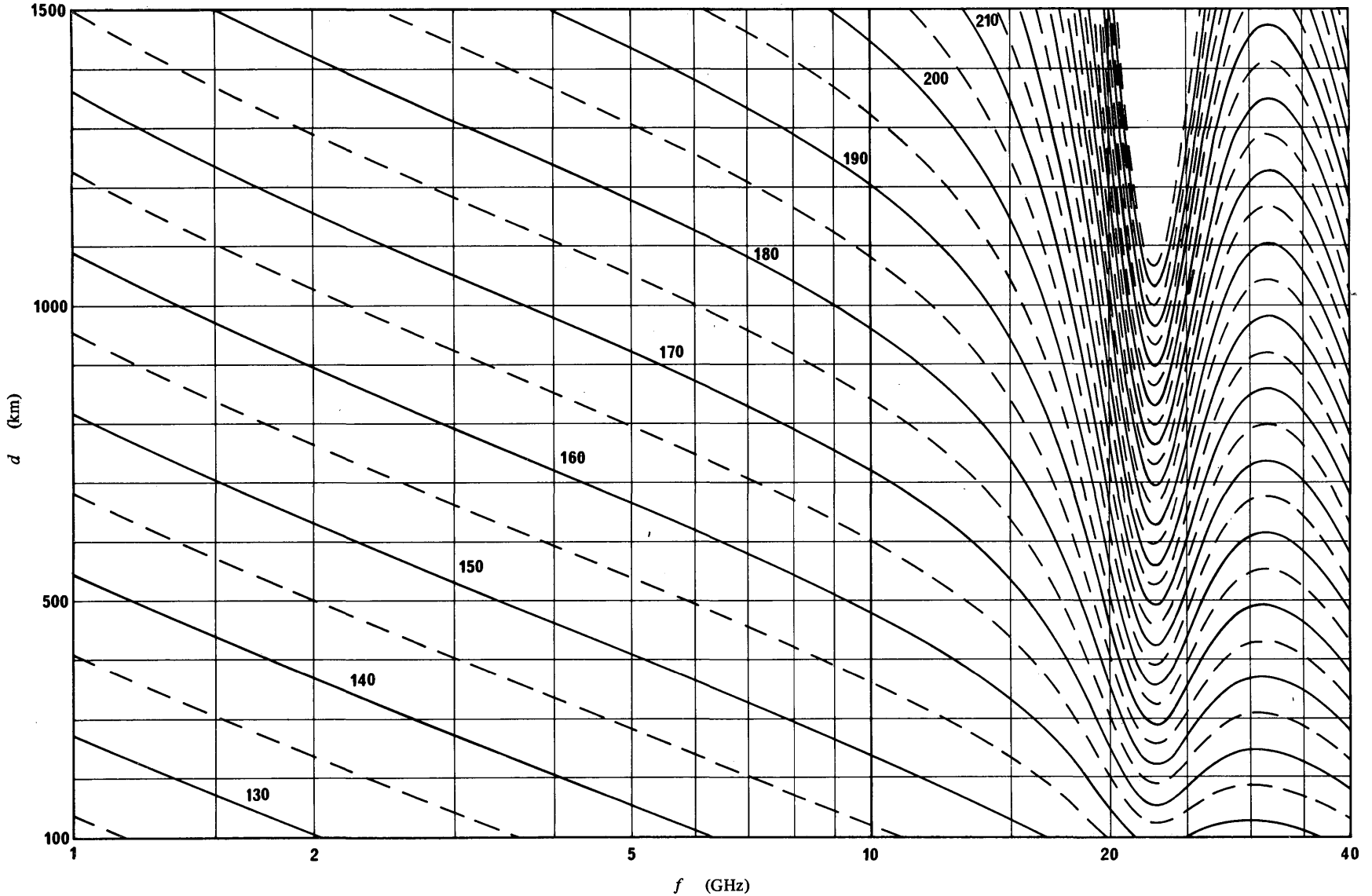



FIGURE 4 – *Affaiblissement de transmission A (dB) en fonction de la distance dans la zone C pendant 0,01% du temps*
(valeurs indiquées sur les courbes en dB ; gamme de fréquences de 1 à 40 GHz)

2.4 Pour une détermination de la distance de coordination dans le mode A, on a tracé les courbes des Fig. 2, 3 et 4 à partir des formules du § 2.3. La Fig. 2 montre, pour la zone A, la variation de $d_t$ en fonction de $(A - A_s)$ et de la fréquence. Les Fig. 3 et 4 montrent, respectivement pour les zones B et C, la variation de $d_m$ en fonction de $A$ et de la fréquence. * Ces courbes ont été tracées pour des valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne sont pas dépassées pendant 0,01% seulement du temps. Pour d'autres pourcentages du temps, les valeurs de $d_t$ ou $d_m$ indiquées dans les Fig. 2 à 4 doivent être multipliées par les facteurs indiqués dans le Tableau II:

TABLEAU II – *Facteur de distance*

| Zone et distance | $f$ (GHz) | Facteur à appliquer pour les pourcentages du temps: | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 0,001 % | 0,01 % | 0,1 % |
| A, $d_t$ | 1–40 | 1,14 | 1,0 | 0,9 |
| B et C, $d_m$ | 1–15 | 1,6 | 1,0 | 0,64 |
| B et C, $d_m$ | 15–40 | 1,3 | 1,0 | 0,8 |

2.5 *Trajets mixtes, mode A*

Si la distance calculée s'étend sur plusieurs zones (trajet mixte), la prévision se fait de la manière suivante:

En désignant par les indices 1, 2, 3 ... les sections successives du trajet dans des zones différentes, on a:

$$A - A_0 - A_s = (\gamma_1 + \gamma_{v1} + \gamma_o)d_1 \qquad (8)$$

Si $d_1$ est supérieure à la distance $D_1$ dans la première zone pour la direction considérée, le trajet se prolonge dans la deuxième zone, et on peut écrire:

$$A - A_0 - A_s - (\gamma_1 + \gamma_{v1} + \gamma_o)D_1 = (\gamma_2 + \gamma_{v2} + \gamma_o)d_2 \qquad (9)$$

d'où l'on tire $d_2$. Si $d_2$ est supérieure à la longueur $D_2$ du trajet dans la deuxième zone, on peut écrire:

$$A - A_0 - A_s - (\gamma_1 + \gamma_{v1} + \gamma_o)D_1 - (\gamma_2 + \gamma_{v2} + \gamma_o)D_2 = (\gamma_3 + \gamma_{v3} + \gamma_o)d_3 \qquad (10)$$

d'où l'on tire $d_3$. La méthode peut être répétée aussi souvent qu'on le désire; dans le cas considéré, la distance totale a pour expression:

$$D = D_1 + D_2 + d_3 \qquad \text{(km)}$$

## 3. Mode B: Diffusion par la pluie

Dans ce mode de propagation, des brouillages peuvent se produire même pour de très grands angles de diffusion et lorsque les intersections des faisceaux sont extérieures au plan du grand cercle. On admet que, si la station terrienne est protégée contre le brouillage dû au mode A par des collines environnantes formant écran, la distance de coordination est déterminée par la diffusion due à la pluie. Il va de soi que cet effet risque d'être particulièrement important dans les régions des moussons.

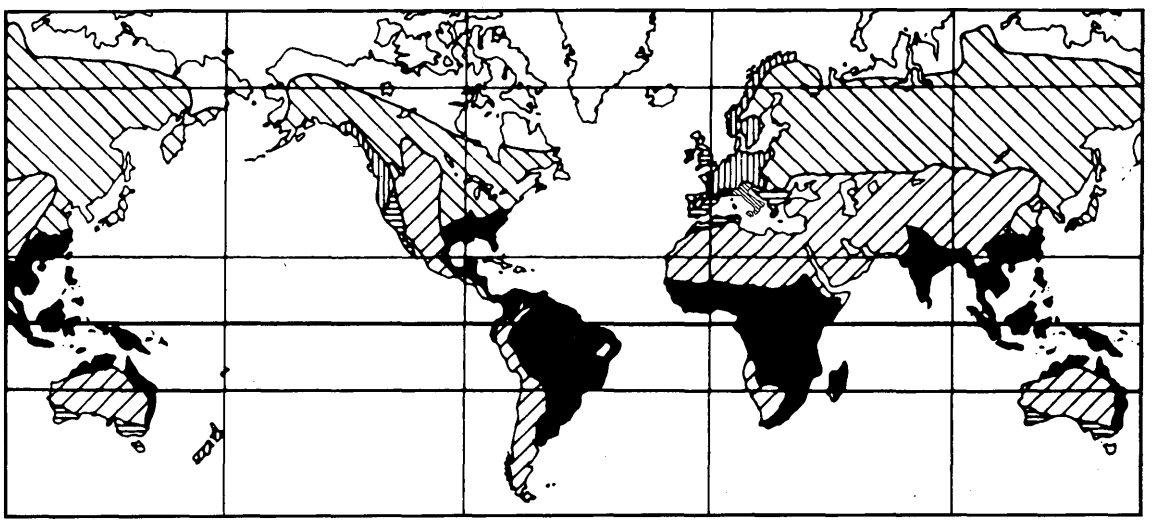
Les caractéristiques des précipitations utilisées dans le présent Rapport sont représentatives d'une large gamme de résultats d'observations; elles ont délibérément été choisies avec prudence. Le Rapport 563-1 contient une première tentative de détermination théorique des caractéristiques des précipitations pluvieuses pour les différents climats; il convient de noter toutefois qu'il n'a pas encore été possible de choisir les paramètres théoriques fondamentaux convenant aux précipitations dans toutes les conditions rencontrées dans la réalité. On considère par conséquent que, en l'état actuel des choses, la meilleure façon d'aborder le problème des précipitations est d'utiliser les données contenues dans le présent Rapport.

### 3.1 *Méthode d'évaluation*

#### 3.1.1 *Généralités*

Pour ce mode de propagation, la classification précédente en zones A, B et C n'est plus applicable. Etant donné que la diffusion de l'énergie dépend des précipitations, on divise le globe terrestre en cinq zones hydrométéorologiques (voir la Fig. 5). En relation avec cette figure, la Fig. 6 donne la distribution du taux de précipitation pour chaque zone en fonction du pourcentage du temps.

* Pour les trajets maritimes, on admet par hypothèse que $A_s$ est nul.



1
2
3
4
5

FIGURE 5 – *Zones hydrométéorologiques correspondant aux distributions du taux de précipitation représentées à la Fig. 6*

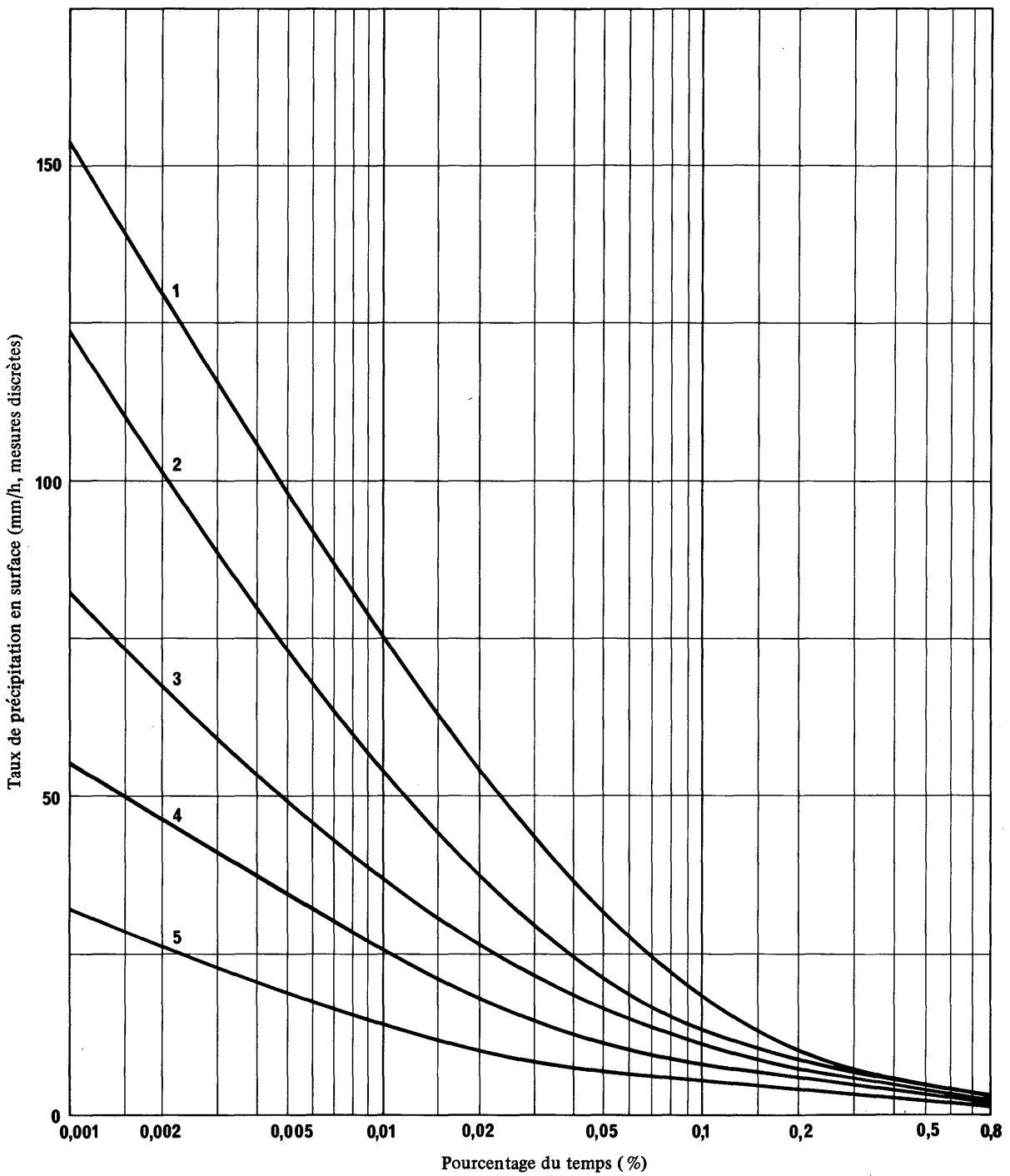



FIGURE 6 – *Pourcentage du temps d'une année moyenne pendant lequel le taux de précipitation indiqué est dépassé dans les cinq zones hydrométéorologiques représentées à la Fig. 5*

On admet comme hauteur maximale des cellules pluvieuses correspondant à des taux de précipitation non dépassés pendant trois pourcentages de temps typiques, pour les différentes zones hydrométéorologiques, les valeurs indiquées dans le Tableau III.

TABLEAU III – *Hauteurs maximales des cellules pluvieuses*

| Zone hydrométéorologique | | 0,001 % | 0,01 % | 0,1 % |
|---|---|---|---|---|
| 1 | (km) | 15 | 11 | 7 |
| 2 | (km) | 11 | 7 | 5 |
| 3, 4 et 5 | (km) | 7 | 5 | 3 |

On admet que le coefficient de réflexion diminue à raison de 1 dB/km, de la surface jusqu'aux hauteurs indiquées.

On notera que les climats 1 et 2 sont caractérisés par des taux de précipitation supérieurs à ceux des autres climats, mais aussi par des hauteurs de cellule de précipitation plus grandes. La conséquence est que l'influence de la diffusion par la pluie sur les distances de coordination est maximale dans les climats 1 et 2.

Pour pouvoir tracer sous la forme d'un cercle le contour de coordination correspondant à la diffusion par la pluie, on résout l'équation de l'affaiblissement de transmission uniquement pour la distance de rétrodiffusion, $r_b$. On obtient ainsi un contour de coordination un peu plus grand que celui qui aurait été obtenu avec la méthode exacte décrite dans le Rapport 569-1.

La formule ci-après est suffisamment précise pour l'affaiblissement de transmission $L$ pendant 0,01% du temps:

$$L = 199 + 20 \log r_b - 20 \log(f) - 10 \log Z - 10 \log g_T + 10 \log A_b - 10 \log C - 10 \log D + r_o \gamma_o + r_w \gamma_v \quad \text{(dB)} \qquad (11)$$

où:

$$10 \log Z = 26 + 14 \log R - \frac{(r_b - r_h)^2}{17\,000} \quad \text{(dB)}$$

$R$: taux de précipitation à la surface du sol (mm/h), donné dans le Tableau IV;

$r_h$: distance de l'horizon radioélectrique; pour une hauteur d'antenne courante, $h = 100$ m, on a $r_h = 40$ km (surface terrestre uniforme);

$10 \log g_T = 42$ dB (voir le § 3.1.2 *b)* ci-après)

$10 \log A_b = 0{,}005\,(f-10)^{1{,}7}\,R^{0{,}4}$ (dB), si 10 GHz $\leqslant f <$ 40 GHz

$= 0$ (dB), si $f <$ 10 GHz

$$10 \log C = 10 \log \left[ \frac{2{,}17}{\gamma \times D} \left( 1 - 10^{\frac{-\gamma \times D}{5}} \right) \right] \quad \text{(dB), si } f > 5 \text{ GHz}$$

$= 0$ (dB), si $f \leqslant 5$ GHz

$\gamma = 0{,}008\,R\,(f-5)$ (dB/km), si $f >$ 5 GHz

$= 0$ (dB/km), si $f \leqslant 5$ GHz

$D$ = distance parcourue à travers la cellule de pluie (km), comme indiqué au Tableau IV;

$r_o = 0{,}7\,(r_b - r_h) + 60$ (km); si $(r_b - r_h) <$ 300 km

$= (230 + r_h)$ (km); si $(r_b - r_h) \geqslant$ 300 km

$r_w = 0{,}7\,(r_b - r_h) + 60$ (km); si $(r_b - r_h) <$ 200 km

$= (160 + r_h)$ (km); si $(r_b - r_h) \geqslant$ 200 km

$\gamma_o$, $\gamma_v$: à calculer au moyen des formules (5) et (6) ci-dessus; pour $\gamma_v$, prendre les valeurs de $\rho$ indiquées dans le Tableau IV.

TABLEAU IV – *Valeurs caractéristiques de certains paramètres pour les cinq zones hydrométéorologiques (0,01 % du temps)*

| Paramètre | Zone hydrométéorologique | | | | | Unité |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Taux de précipitation ($R$) | 75 | 55 | 37 | 26 | 14 | mm/h |
| Diamètre de la cellule de pluie ($D$) | 2,5 | 2,8 | 3 | 3,4 | 4,5 | km |
| Teneur en vapeur d'eau ($\rho$) | 10 | 5 | 2 | 2 | 2 | g/m$^3$ |

La méthode spécifiée plus haut permet d'obtenir $r_b$ sur ordinateur. Les Fig. 7, 8, 9, 10 et 11 montrent des solutions graphiques obtenues par l'application des formules ci-dessus.

Pour tracer le contour de coordination dans le cas de la diffusion par la pluie, il faut utiliser les courbes des Fig. 7, 8, 9, 10 et 11 de la manière suivante:

*a)* déterminer, pour une fréquence et un affaiblissement de transmission donnés, la distance de rétrodiffusion ($r_b$) pour la zone hydrométéorologique concernée;

*b)* déterminer un point à la distance $\Delta d$ dans l'azimut du lobe principal de la station terrienne. Cette distance peut être tirée de la Fig. 12 en fonction de l'angle de site du lobe principal de l'antenne de la station terrienne et de la distance de rétrodiffusion $r_b$, ou calculée par la formule suivante:

$$\Delta d = \frac{(r_b - 40)^2}{17\,000} \text{ cotg } \theta_e \qquad (12)$$

où $\theta_e$ est l'angle de site du lobe principal de l'antenne de la station terrienne;

*c)* tracer un cercle de rayon $r_b$ centré sur le point trouvé.

3.1.2 *Facteurs de correction*

Avant d'exécuter les diverses opérations *a), b)* et *c)*, il peut être nécessaire de procéder aux corrections suivantes:

a) *Correction portant sur le pourcentage du temps*

Pour les pourcentages du temps compris entre 0,001% et 0,1%, à l'exclusion de 0,01%, le facteur de correction $F_1(p,f)$, indiqué dans la Fig. 13, doit être ajouté à l'affaiblissement de transmission indiqué dans les Fig. 7, 8, 9, 10 et 11;

b) *Correction portant sur le gain d'antenne de la station de Terre*

Les courbes des Fig. 7 à 11 ont été tracées dans le cas d'une station de Terre ayant un gain de 42 dB dans le lobe principal. Si les stations de Terre ont des gains différents de cette valeur dans le lobe principal, il faut en tenir compte dans les Fig. 7, 8, 9, 10 et 11.

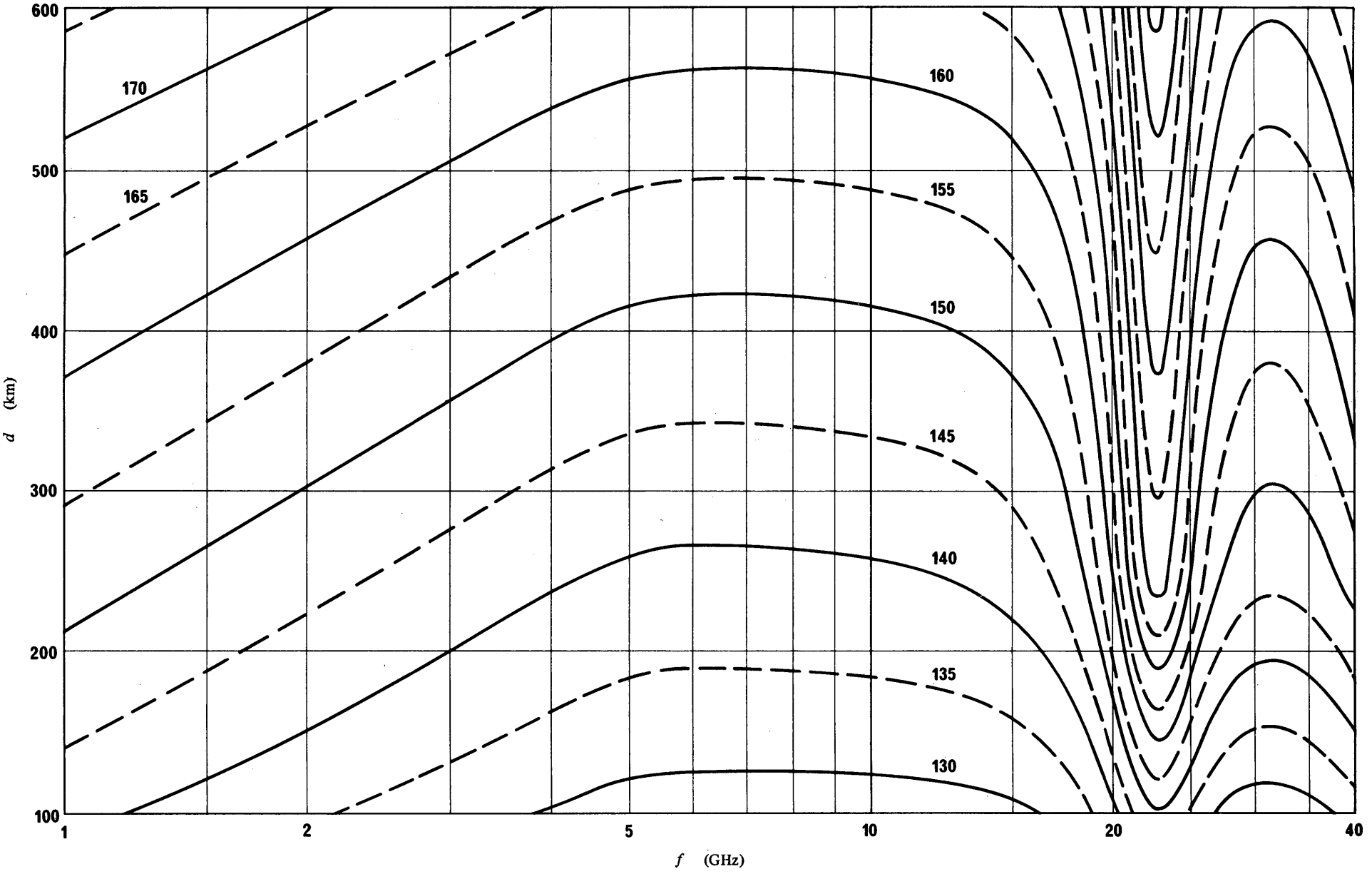



FIGURE 7 – *Distance de diffusion par la pluie en fonction de la fréquence – zone hydrométéorologique 1 – pendant 0,01% du temps*

Les chiffres portés sur les courbes indiquent l'affaiblissement de transmission en dB

(voir Tableau V)

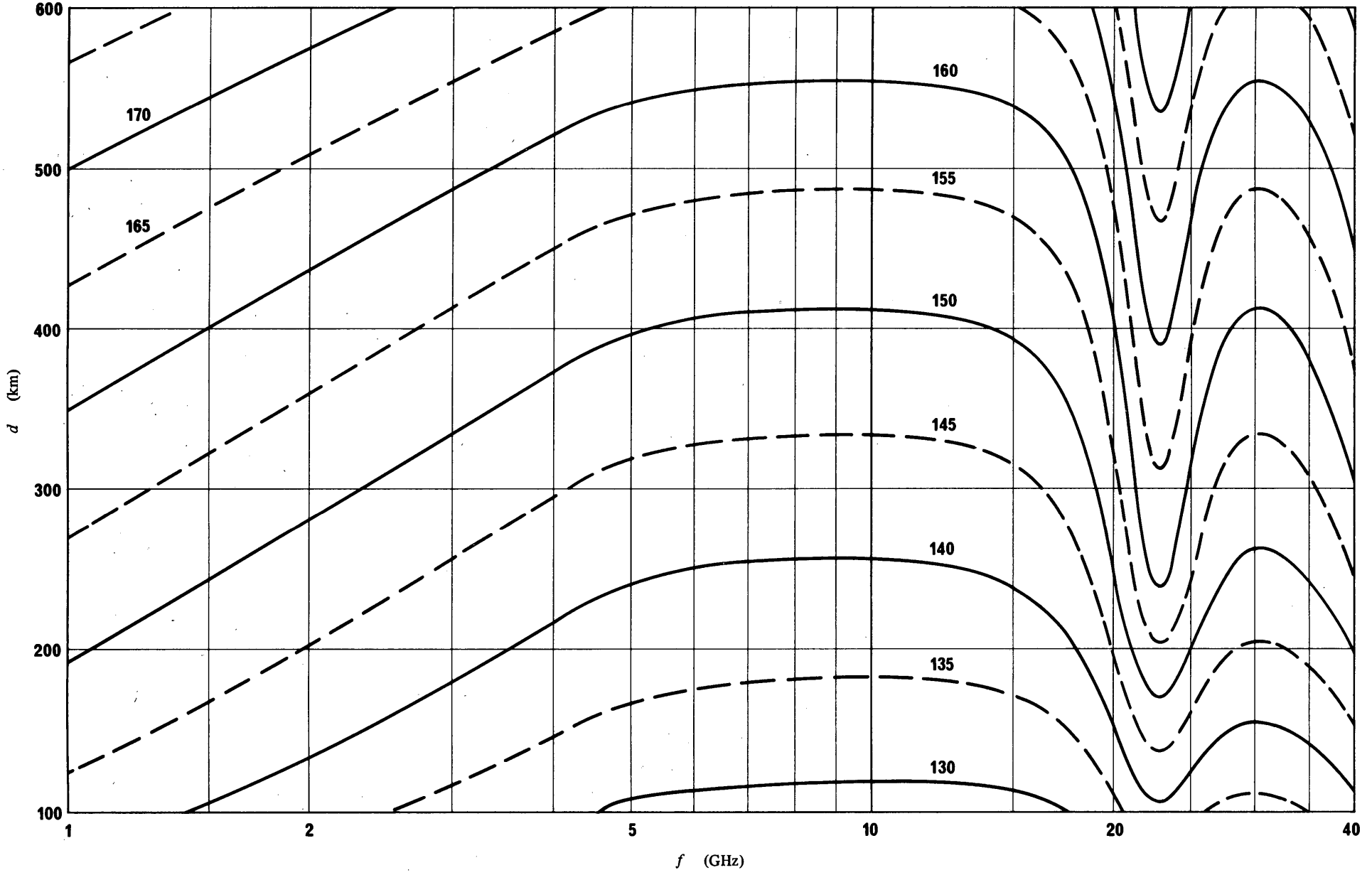



FIGURE 8 – *Distance de diffusion par la pluie en fonction de la fréquence – zone hydrométéorologique 2 – pendant 0,01 % du temps*

Les chiffres portés sur les courbes indiquent l'affaiblissement de transmission en dB

(voir Tableau V)

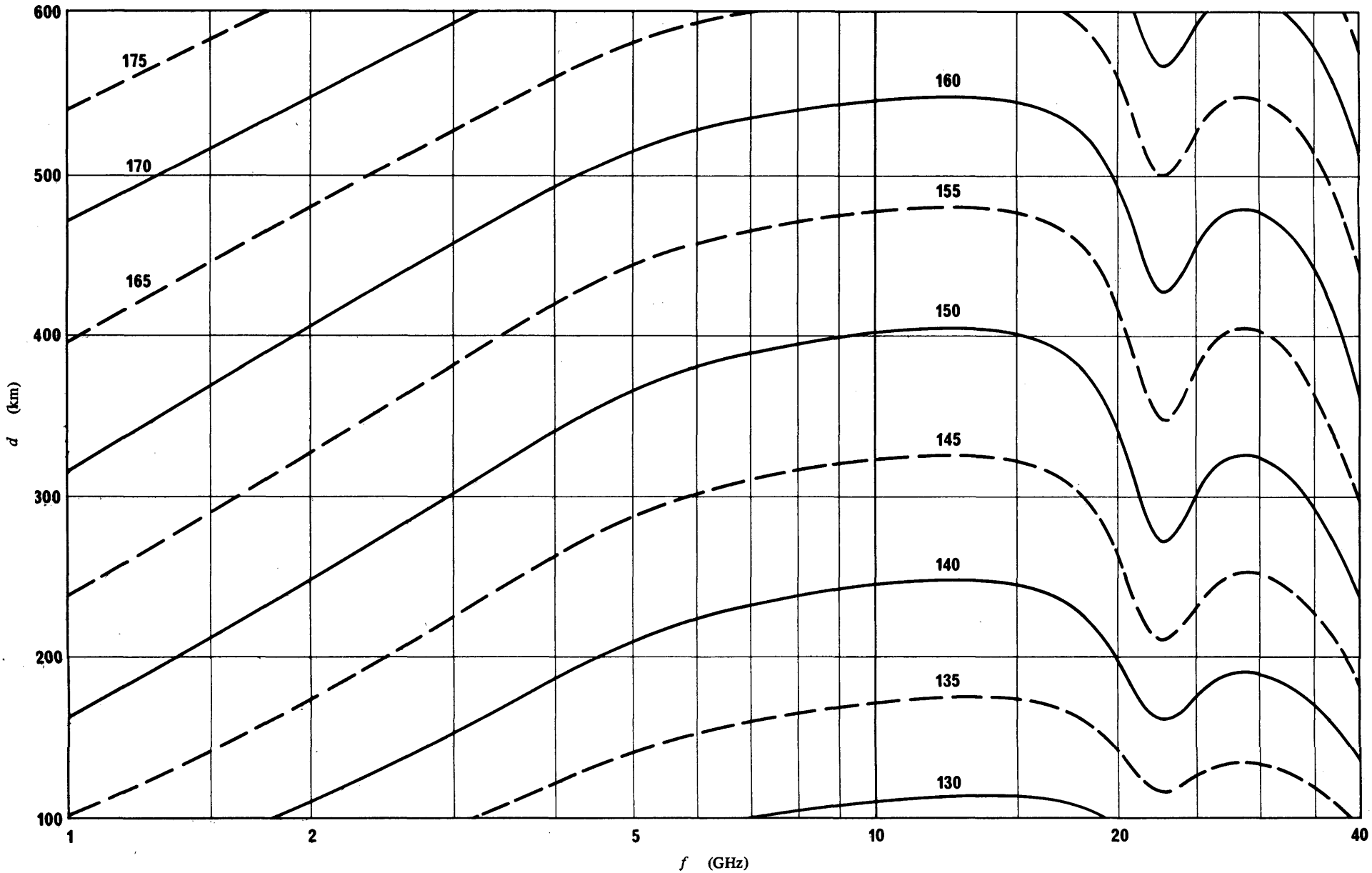



FIGURE 9 – *Distance de diffusion par la pluie en fonction de la fréquence – zone hydrométéorologique 3 – pendant 0,01% du temps*

Les chiffres portés sur les courbes indiquent l'affaiblissement de transmission en dB

(voir Tableau V)

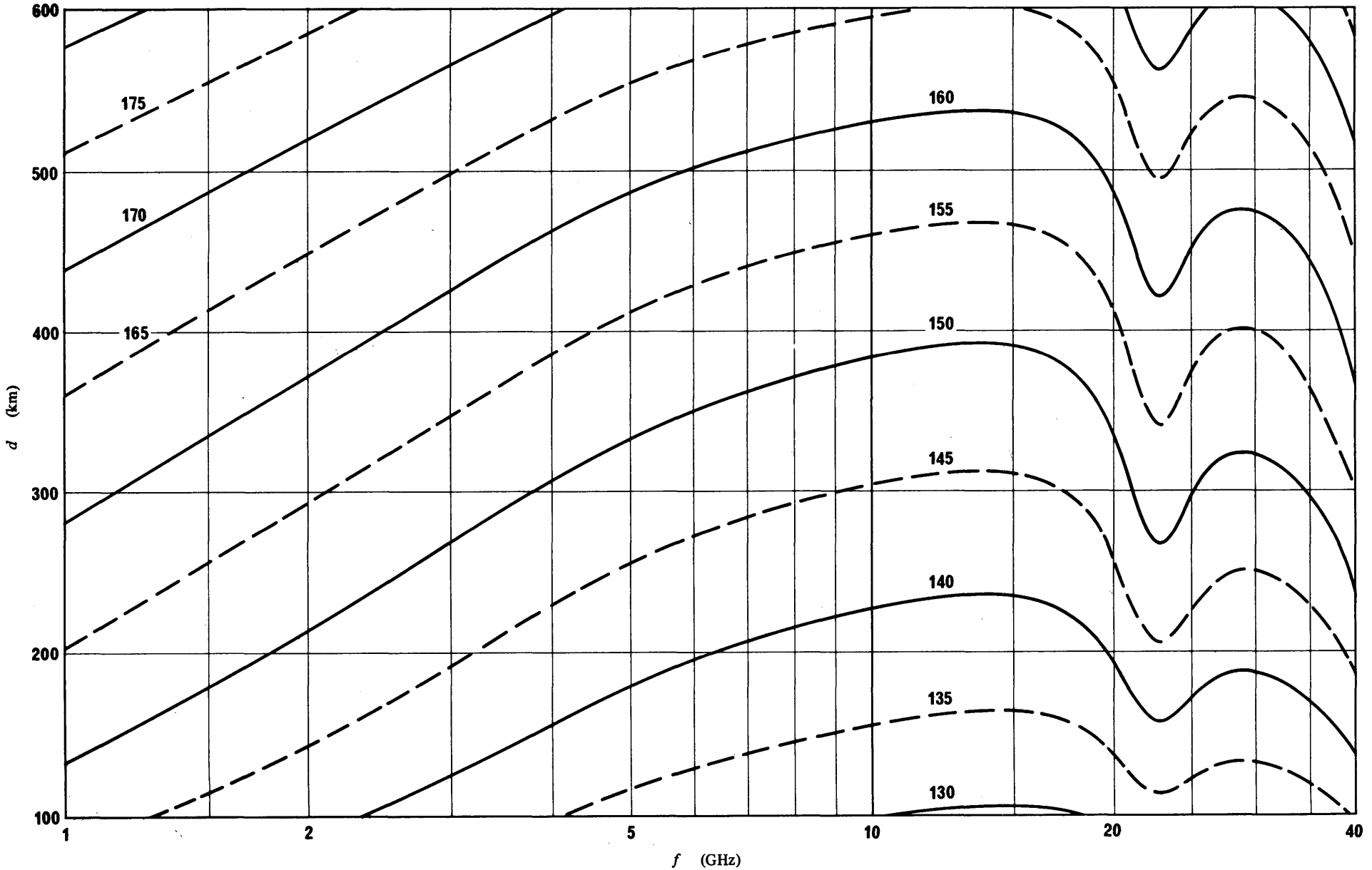



FIGURE 10 – *Distance de diffusion par la pluie en fonction de la fréquence – zone hydrométéorologique 4 – pendant 0,01% du temps*

Les chiffres portés sur les courbes indiquent l'affaiblissement de transmission en dB

(voir Tableau V)

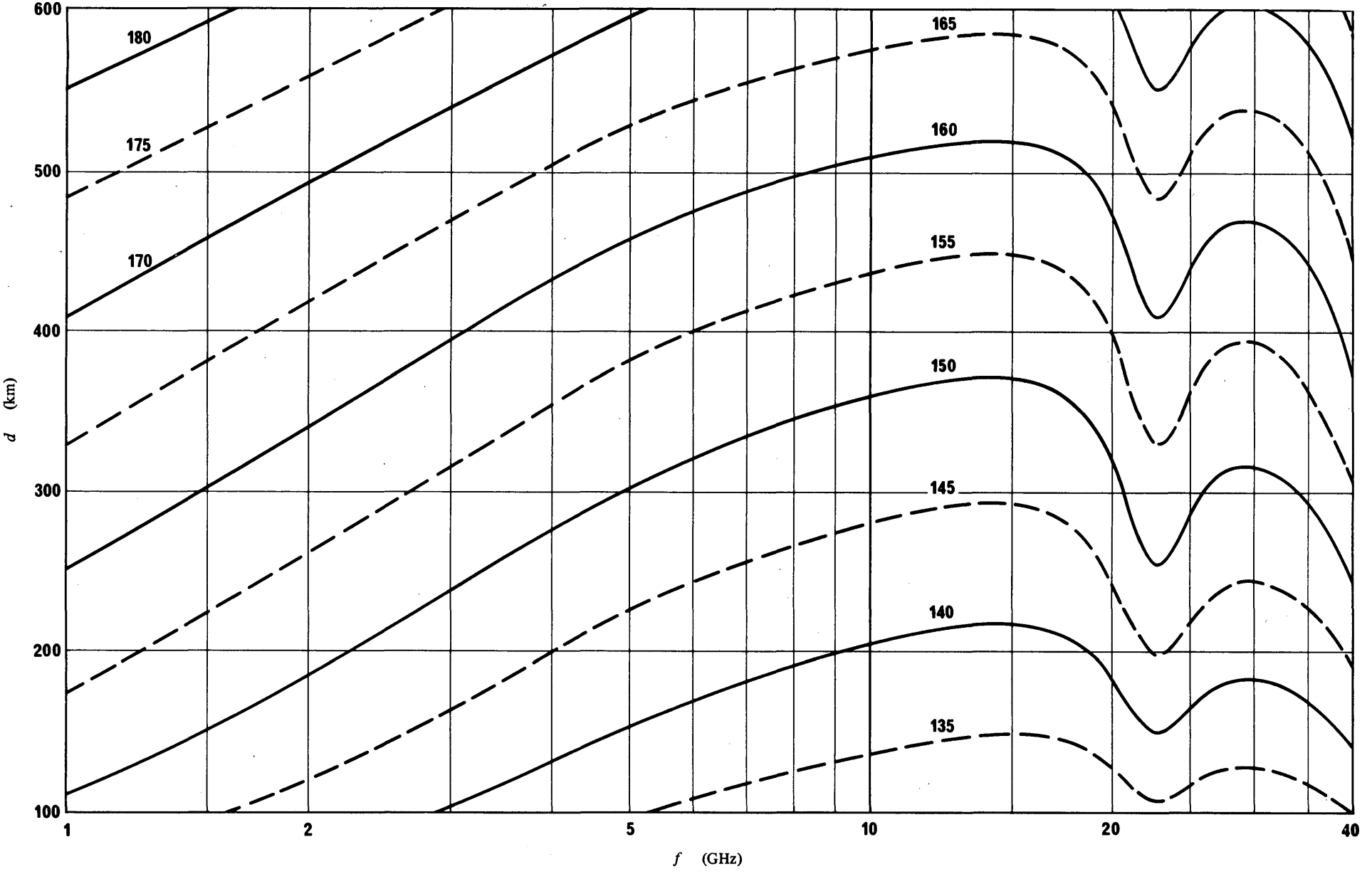



FIGURE 11 – *Distance de diffusion par la pluie en fonction de la fréquence – zone hydrométéorologique 5 – pendant 0,01 % du temps*

Les chiffres portés sur les courbes indiquent l'affaiblissement de transmission en dB

(voir Tableau V)

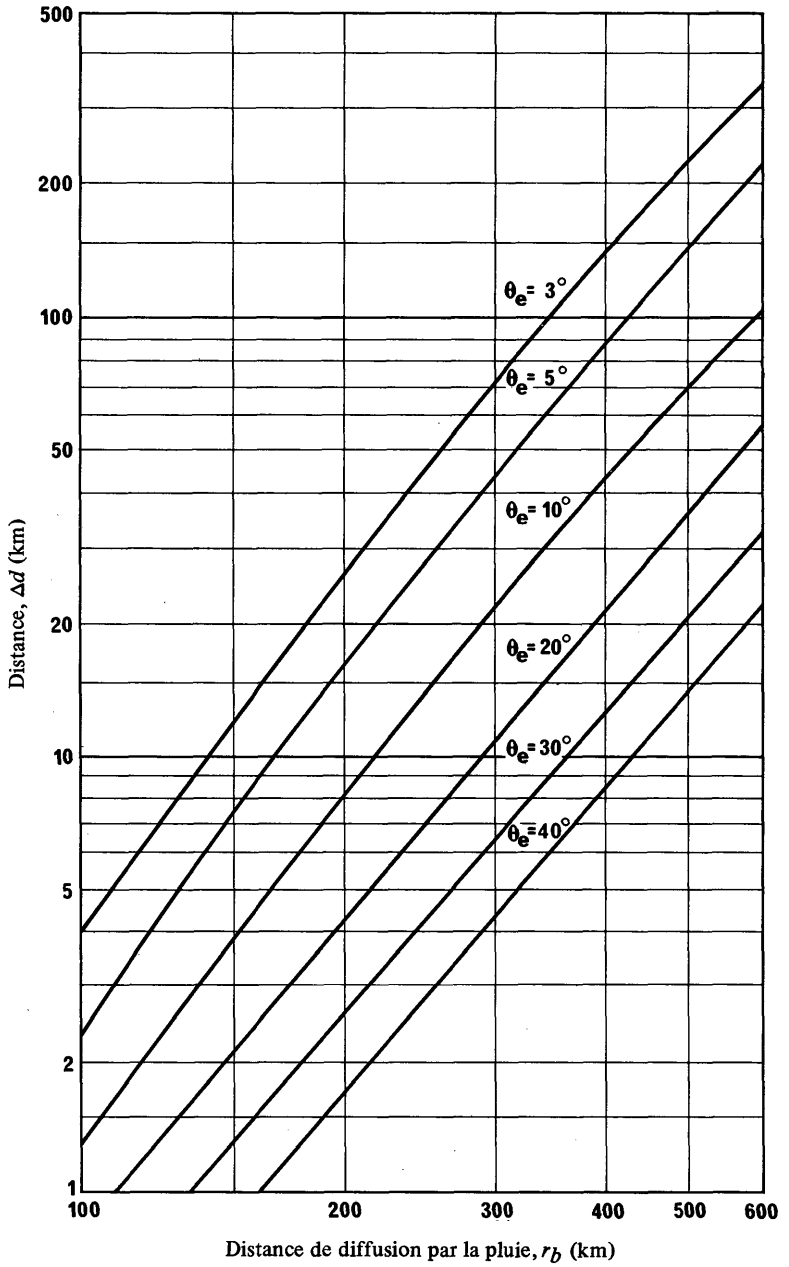



FIGURE 12 – *Distance $\Delta d$ en fonction de la distance de rétrodiffusion $r_b$ et de l'angle de site $\theta_e$ du lobe principal de l'antenne de la station terrienne*

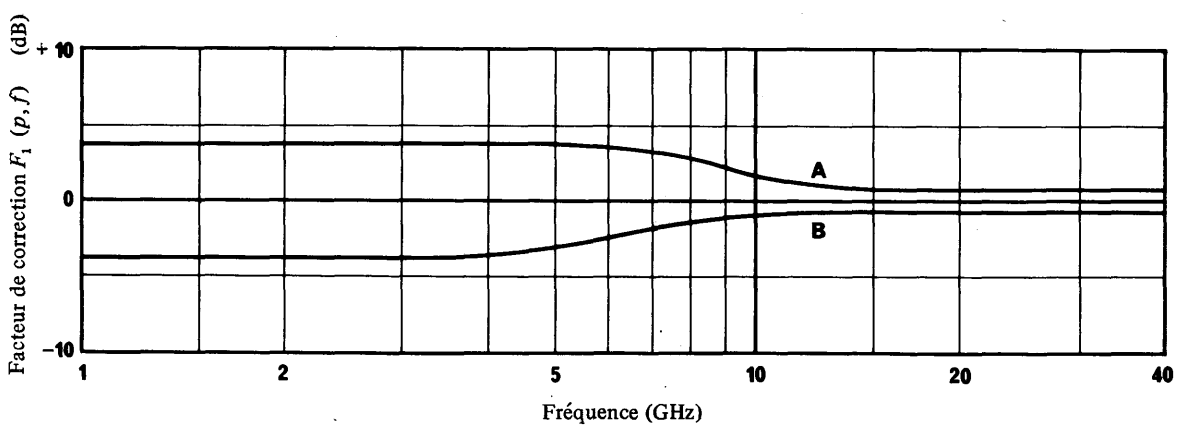



FIGURE 13 – *Facteur de correction de l'affaiblissement, valable pour toutes les zones hydrométéorologiques, pour passer du pourcentage du temps de 0,01% à:*

*– 0,1% du temps (courbe A)*
*– 0,001% du temps (courbe B)*

3.1.3 *Distances maximales de diffusion par la pluie*

Les hauteurs des cellules pluvieuses au-dessus desquelles les effets de la diffusion par la pluie ne devraient pas être notables (parce qu'au-dessus la teneur en eau liquide est négligeable) ont été indiquées au Tableau III pour chaque zone hydrométéorologique et différents pourcentages du temps. Il en découle pour les distances maximales de diffusion par la pluie les valeurs figurant dans le Tableau V (voir les Fig. 7 à 11):

TABLEAU V – *Distances maximales de diffusion par la pluie (km)*

| Zone hydrométéorologique | Pourcentage du temps | | |
|---|---|---|---|
| | 0,1 % | 0,01 % | 0,001 % |
| 1 (km) | 390 | 470 | 540 |
| 2 (km) | 330 | 390 | 470 |
| 3, 4 et 5 (km) | 270 | 330 | 390 |

Ces courbes d'affaiblissement de transmission ont été tracées systématiquement jusqu'à une distance de 600 km, mais on ne tiendra pas compte des valeurs supérieures aux distances maximales indiquées dans le Tableau V.

3.2 *Absence d'effets inhérents aux trajets mixtes*

Comme la diffusion par la pluie ne se manifeste notablement que dans dans la région locale de la station terrienne, le cas des trajets mixtes ne se pose pas. On considère la zone hydrométéorologique où se trouve la station terrienne pour tirer du Tableau V la distance maximale de diffusion par la pluie.

3.3 *Conclusion*

La diffusion par la pluie a peu de chances de jouer un rôle important dans la propagation de signaux brouilleurs à des fréquences très supérieures à 20 GHz. En outre, les cellules de précipitation dont le diamètre est supérieur à celui indiqué au Tableau IV causent un affaiblissement supplémentaire du signal brouilleur, et les autres cellules qui peuvent se trouver sur les trajets allant aux deux stations terminales contribuent encore à son affaiblissement.

QUESTIONS ET PROGRAMMES D'ÉTUDES, DÉCISIONS, RÉSOLUTIONS ET VŒUX

## QUESTION 1-2/5

### INFLUENCE DU SOL SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

(1965 - 1966 - 1970 - 1974)

Le CCIR,

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 $\varepsilon$ et de la conductivité $\sigma$ 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 $\varepsilon$ et de $\sigma$;

3. comment développer davantage l'étude mathématique afin de tenir compte des variations arbitraires de $\varepsilon$ et de $\sigma$, notamment dans les cas de propagation s'effectuant obliquement par rapport aux séparations et dans les cas de stratification non horizontale et étudier, à cette occasion, les irrégularités de surface et les constantes d'un sol non homogène;

4. comment réduire les méthodes analytiques à une forme qui convienne aux calculs techniques, ou, à titre de variante, comparer les résultats théoriques avec ceux des méthodes semi-empiriques afin de définir plus exactement les limitations de ces dernières;

5. comment examiner de manière plus approfondie la validité de la méthode qui permet de déduire les paramètres équivalents du sol à partir de la dispersion des atmosphériques;

6. quelle est l'influence sur les ondes se propageant au-dessus de la surface terrestre des variations de facteurs tels que la température, la végétation, le climat ou d'autres causes;

7. quelle est l'influence des accidents de terrain, et notamment celle des obstacles dont les dimensions sont grandes par rapport à la longueur d'onde considérée;

8. quelle est l'influence des accidents de terrain sur les caractéristiques de la propagation telles que les évanouissements dans la propagation troposphérique?

*Note.* – Voir le Rapport 229-3.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 1A-1/5

### EFFETS DES ACCIDENTS DE TERRAIN SUR LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE

(1951 - 1953 - 1956 - 1959 - 1963 - 1970 - 1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* qu'il est très important de poursuivre les études concernant la propagation des ondes sur un terrain accidenté jusqu'à des fréquences de plusieurs GHz;

*b)* que la propagation par-dessus la crête des hautes montagnes présente parfois une grande importance dans la pratique;

*c)* que la présence d'obstacles sur le trajet peut modifier, dans une large mesure, la valeur moyenne de l'affaiblissement de transmission, ainsi que l'amplitude et la durée des évanouissements;

*d)* que les effets d'écran du terrain ont une grande importance pratique dans les études de brouillage,

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

1. influence de l'existence de plusieurs obstacles sur un même trajet;
2. influence du rayon de courbure et de la nature du terrain au sommet d'une montagne;
3. affaiblissement et variation de l'angle d'arrivée imputables à un terrain accidenté et à l'existence de structures conductrices, pour les emplacements situés à l'intérieur de la zone de service et autour d'un émetteur, et pour les points de réception situés à des distances beaucoup plus grandes;
4. propagation dans des zones urbaines;
5. effet d'écran produit par des obstacles locaux présents sur le terrain au voisinage d'une station, compte tenu des mécanismes de propagation sur le trajet;
6. influence du terrain accidenté sur les variations à court terme et à long terme de l'affaiblissement de transmission;
7. problèmes liés à la polarisation des ondes radioélectriques, lorsqu'elle est influencée par les accidents du terrain au-dessus duquel ces ondes se propagent et par l'existence de structures conductrices au-dessus du terrain;
8. variations de la phase en fonction de la distance sur un terrain accidenté;
9. conditions relatives au gain d'obstacle (c'est-à-dire quand le signal reçu sur un trajet montagneux a une plus grande intensité que si le terrain n'était pas accidenté), et variations à court terme et à long terme de l'affaiblissement de transmission dans ces conditions.

*Note.* – Voir les Rapports 236-4 et 715.

---

## QUESTION 2-3/5

## INFLUENCE DE L'ATMOSPHÈRE NON IONISÉE SUR LA PROPAGATION DES ONDES

**Radiométéorologie pour les télécommunications**

(1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que la propagation des ondes radioélectriques est fonction des conditions thermodynamiques qui règnent dans l'atmosphère;

*b)* que les études de propagation nécessaires à l'établissement d'une liaison de radiocommunication de Terre, onde radiocommunication spatiale, nécessitent une connaissance du milieu de propagation, c'est-à-dire de l'atmosphère,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles sont les méthodes et les instruments les plus appropriés pour l'étude des variations des paramètres thermodynamiques de l'atmosphère qui affectent la propagation des ondes (voir les Notes 1 et 2);
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 la propagation des ondes radioélectriques;
6. quelle est la valeur relative des différentes méthodes estimant les effets des hydrométéores sur la propagation des ondes radioélectriques?

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

*Note 2.* – 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.

*Note 3.* – Voir les Rapports 563-1, 714, 718, 719, 721 et 723.

---

QUESTION 3-2/5

## EFFETS TROPOSPHÉRIQUES SUR LES FRÉQUENCES INFÉRIEURES A 30 MHz

(1951 - 1953 - 1956 - 1963 - 1966 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que les courbes de propagation de l'onde de sol établies pour les fréquences inférieures à 30 MHz et jointes à l'Avis 368-3 tiennent compte des effets de la réfraction troposphérique;

*b)* qu'il peut être important de tenir compte de ces effets sur des fréquences nettement inférieures à 30 MHz et pour des liaisons à très grande distance, étant donné l'extension que prennent les aides à la navigation utilisant les techniques de transmission par impulsions dont le degré de précision dépend du mode de propagation de l'onde de sol,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

1. quelles mesures du champ de l'onde de sol sont-elles nécessaires pour déterminer expérimentalement les effets de la troposphère sur les fréquences inférieures à 30 MHz;

2. quelle est l'influence de la troposphère sur l'amplitude et la phase de l'onde de sol, y compris les effets anormaux?

---

QUESTION 5-3/5

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

(1953 - 1956 - 1959 - 1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que la qualité de transmission par faisceau hertzien terrestre, ou par système de télécommunication spatiale, est conditionnée par les caractéristiques de propagation, en particulier pour les valeurs de l'affaiblissement de transmission les plus élevées que l'on peut rencontrer et par les variations temporelles de la fonction de transfert ou de la réponse impulsionnelle du canal de propagation;

*b)* que des brouillages entre différents systèmes peuvent occasionnellement se produire par suite d'une propagation anormale, soit sur des trajets Terre-espace, soit sur des trajets transhorizon de Terre,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

quelles sont les caractéristiques de la propagation et du bruit à prendre en considération pour établir des systèmes de télécommunication de Terre et des systèmes de télécommunication spatiale conformes aux Avis du CCIR en ce qui concerne leurs qualités et les brouillages mutuels?

*Note.* – Les Commissions d'études 1 et 6 procèdent à d'autres études du bruit radioélectrique pour répondre aux Questions 46/1 et 7/6.

---

PROGRAMME D'ÉTUDES 5A-3/5

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS A VISIBILITÉ DIRECTE

(1963 - 1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

qu'une meilleure connaissance des caractéristiques de propagation est d'une grande importance dans la conception de faisceaux hertziens économiques en visibilité directe et contribue grandement à améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes,

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

1. répartition dans le temps, pour chaque mois de l'année, des valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence (résultant de la propagation par trajets multiples, de la diffraction, de l'absorption, etc.) dans les bandes d'ondes métriques, décimétriques, centimétriques et millimétriques;

2. limitations imposées à la qualité des systèmes, par les effets de la propagation par trajets multiples, ceux de la scintillation et des réflexions sur les bâtiments;

3. variation du découplage de deux polarisations orthogonales, due à la propagation par trajets multiples, aux précipitations ou à toute autre cause;

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

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

6. mesure dans laquelle les facteurs mentionnés ci-dessus dépendent des conditions de propagation, par exemple la longueur du trajet, le climat, la nature du terrain au-dessus duquel passe le trajet;

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

8. caractéristiques de propagation (par exemple, corrélation entre les signaux) que l'on peut utiliser pour améliorer la qualité de fonctionnement des systèmes;

9. fréquence et durée des évanouissements dépassant les valeurs spécifiées; vitesse de variation du signal reçu pendant ces évanouissements.

*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, et 1 min – de la puissance de bruit (dépendant de l'affaiblissement de transmission et de la propagation par trajets multiples) à la sortie d'un système;
- que l'on fasse des mesures simultanées de l'affaiblissement sur le trajet et de la dépolarisation, avec une durée de mesure inférieure à une seconde, et de préférence inférieure à 100 ms, les résultats étant exprimés de telle manière qu'on puisse en tirer des statistiques concernant «le mois le plus défavorable».

Il est reconnu que, dans la pratique, les estimations de l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant les pourcentages du temps inférieurs à 1% et supérieurs à 99% sont beaucoup moins dignes de foi que celles valables pour des pourcentages du temps compris entre 1% et 99%; néanmoins il convient de faire des estimations de l'affaiblissement de transmission correspondant à des pourcentages de temps très faibles et très élevés, par exemple 99,9998%.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 5B-1/5

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION NÉCESSAIRES AUX FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON

(1963 - 1970)

Le CCIR,

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 également prévoir l'affaiblissement de transmission le plus élevé;

4. 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.* – Voir le Rapport 238-3.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 5C-3/5

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION ET SUR LE BRUIT NÉCESSAIRES AUX SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION SPATIALE

(1963 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* qu'il est nécessaire, dans la conception des systèmes de radiocommunication spatiale, de tenir compte de certains phénomènes qui affectent la propagation des ondes à travers la troposphère;

*b)* qu'il importe de connaître les répartitions temporelles de ces phénomènes ainsi que leur variation en fonction de divers facteurs, pour pouvoir déterminer les performances des systèmes ainsi que les brouillages subis ou causés par les stations spatiales,

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

1. répartition dans le temps et dans l'espace des affaiblissements dus aux gaz atmosphériques, aux précipitations, aux nuages ainsi qu'aux tempêtes de sable et de poussière;

2. répartition dans le temps et dans l'espace de la réfraction, de la scintillation, de la divergence des faisceaux et de la cohérence des fronts des ondes radioélectriques qui traversent la troposphère;

3. fréquence d'occurrence et durée des évanouissements dépassant des valeurs spécifiées; rythme de variation du signal reçu pendant ces évanouissements;

4. répartition dans le temps et dans l'espace du bruit rayonné par les constituants de l'atmosphère ainsi que des émissions galactiques et solaires au-dessus de 50 MHz environ (voir Note 1);

5. mesure dans laquelle ces répartitions dépendent de la fréquence, de l'angle de site, de l'emplacement géographique, du temps et de la composition de l'atmosphère;

6. mise au point de méthodes de prévision de ces répartitions ainsi que de leur dépendance des paramètres ci-dessus;

7. effets cumulatifs de ces phénomènes sur les caractéristiques de qualité des systèmes, y compris les effets de brouillage subi par une station spatiale ou causé par cette station;

8. mesure dans laquelle la diversité d'emplacement ou d'autres techniques peuvent être utilisées pour venir à bout des difficultés résultant de l'affaiblissement et du bruit dus aux précipitations et aux nuages;

9. limitations imposées par les effets des précipitations et de la propagation par trajets multiples sur la réutilisation des fréquences fondée sur des techniques de polarisation orthogonale.

*Note 1.* – D'autres études du bruit radioélectrique sont du ressort des Commissions d'études 1 et 6 (voir les Questions 46/1 et 7/6).

*Note 2.* – Voir les Rapports 426-2, 564-1 et 722.

---

PROGRAMME D'ÉTUDES 5D-3/5

## FACTEURS DE PROPAGATION AFFECTANT LE PARTAGE DES BANDES DE FRÉQUENCES ET LA RÉUTILISATION DES FRÉQUENCES SUR DES TRAJETS TERRESTRES *

(1963 - 1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que des données de propagation sur des trajets terrestres sont nécessaires pour planifier la réutilisation des canaux radioélectriques dans les systèmes de télécommunication;

*b)* que, d'après le Règlement des radiocommunications, il convient de déterminer une distance de coordination, ou une zone de coordination, pour les stations terriennes dans les bandes de fréquences partagées entre les services de télécommunication spatiale et les services fixe et mobiles;

*c)* que, dans le calcul des distances de coordination, il convient de tenir compte de tous les mécanismes de propagation pouvant intervenir;

*d)* que, dans le calcul des brouillages entre les systèmes, il faut tenir compte de façon plus détaillée des mécanismes de propagation qui interviennent;

*e)* qu'en vertu des Recommandations N$^{os}$ Spa2 – 15 et Spa2 – 9 de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales (Genève, 1971), le CCIR est invité à étudier la possibilité d'améliorer et de simplifier la méthode permettant de déterminer la zone de coordination et d'étendre l'application de cette méthode aux fréquences inférieures à 1 GHz et supérieures à 40 GHz,

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

**1.** détermination d'une méthode appropriée qui permette de tenir compte des facteurs de propagation troposphérique connus, y compris l'absorption et la diffusion provoquées par les précipitations, l'absorption due aux gaz atmosphériques, les réflexions sur les aéronefs et par d'autres phénomènes se produisant sur l'arc de grand cercle et en dehors de cet arc lorsqu'on étudie le champ reçu à l'extrémité de trajets transhorizon (compte tenu également des effets d'écran du terrain), notamment lorsqu'il s'agit du champ dépassé pendant de faibles pourcentages de temps, par exemple 0,005%, 0,01%, 0,1%, 1% et 20% d'un mois ou d'une année; on déterminera en particulier dans quelle mesure l'utilisation de la distance angulaire fait entrer automatiquement en ligne de compte l'important affaiblissement de transmission que l'on observe généralement lorsque l'angle d'élévation de l'horizon radioélectrique est grand aux deux extrémités du trajet;

**2.** détermination des répartitions de l'amplitude des signaux et de la durée des évanouissements sous l'effet de mécanismes de propagation troposphérique tels que la formation de conduits troposphériques, la diffusion provoquée par les précipitations et la diffusion provoquée par les aéronefs, compte tenu des indications suivantes:

- les répartitions d'amplitude les plus intéressantes sont les répartitions cumulatives des valeurs médianes horaires ** dépassées pendant 0,005%, 0,01%, 0,1%, 1% et 20% du temps, pendant des périodes d'une année au moins, et également durant les mois les plus défavorables (signal utile faible ou signal brouilleur fort);
- les longueurs de trajet les plus intéressantes sont comprises entre 25 et 1000 km; cependant, au-dessus des océans, dans les régions tropicales et équatoriales et dans les régions où le guidage est fréquent, il peut être utile de tenir compte de trajets beaucoup plus longs;

**3.** possibilité de diviser le monde en grandes zones, pour prendre en considération les effets des différentes conditions climatiques, afin de tenir compte de l'importance relative des divers mécanismes troposphériques;

**4.** détermination expérimentale des valeurs d'affaiblissement escomptées sur des trajets mixtes (par exemple partiellement sur terre et partiellement sur mer);

**5.** effet de l'emploi d'antennes à gain élevé si l'on tient compte des cas extrêmes tels que les suivants, qui se produisent lorsqu'il s'agit des services de télécommunication par satellite et de faisceaux hertziens au-dessus de 3 GHz;

5.1 l'antenne de l'une des extrémités du trajet peut être considérée comme ayant un gain soit très voisin de l'unité, soit de l'ordre de 40 dB, son faisceau étant dirigé presque horizontalement dans la direction de l'autre antenne;

5.2 l'antenne de l'autre extrémité du trajet peut avoir un gain de l'ordre de 60 dB, son faisceau étant orienté soit bien au-dessus de l'horizon, soit vers l'autre antenne sous un angle de site d'environ 3° au-dessus de l'horizontale. Les diagrammes de rayonnement des grandes antennes prévues pour les stations terriennes de télécommunication par satellite, à utiliser dans les études de brouillages, sont reproduits dans le Rapport 391-3.

*Note.* – Voir le Rapport 239-4.

---

* Les facteurs de propagation qui caractérisent les trajets de brouillage entre le satellite d'un service de télécommunication spatiale et des systèmes de Terre font l'objet du Programme d'études 5C-3/5.

** Il est souhaitable d'utiliser des périodes d'échantillonnage de durée inférieure à une heure pour faciliter la détermination du champ créé pendant de courtes périodes, par exemple 0,005% du temps. Il est suggéré de considérer une période de 1 minute.

PROGRAMME D'ÉTUDES 5E-3/5

## RÔLE JOUÉ PAR LA DIFFUSION PROVOQUÉE PAR LES PRÉCIPITATIONS DANS LES BROUILLAGES ENTRE SYSTÈMES DE TERRE ET SYSTÈMES SPATIAUX

(1966 - 1970 - 1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que la pluie, la grêle, la neige, ainsi que certaines hétérogénéités de la structure de l'indice de réfraction de l'atmosphère, sont aptes à diffuser les ondes radioélectriques plus fortement et sous de plus grands angles que ne le font des conditions atmosphériques normales, et que des mesures ont confirmé l'importance de cet effet;

*b)* que l'étude de ces phénomènes doit être poursuivie afin que l'on puisse tenir compte de leurs effets dans le choix de l'emplacement des antennes des stations de faisceaux hertziens qui utilisent en partage des canaux électriques,

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

1. détermination du domaine angulaire et des distances dans lesquelles la diffusion provoquée par les précipitations et par certaines hétérogénéités de l'atmosphère peut être considérée comme une source probable de brouillage entre les stations et, en général, de la relation entre ce domaine angulaire et l'angle de diffusion, la distance, la polarisation et la fréquence, pour les fréquences supérieures à 1 GHz;

2. par unité de volume, détermination de la répartition moyenne dans le temps et dans l'espace des valeurs observées de la section efficace de diffusion, en fonction:
- de la hauteur au-dessus du sol,
- de l'heure de la journée,
- de la saison,
- de la région climatique;

3. recherche éventuellement d'une relation simple entre la section de diffusion et la quantité des précipitations (mm d'eau par heure) en cas de chutes de pluie et d'autres formes de précipitations qui provoquent une diffusion notable;

4. méthodes de calcul des brouillages auxquels il y a lieu de s'attendre, notamment dans le cas où les lobes des antennes des stations de faisceaux hertziens ne se coupent pas.

---

QUESTION 7-1/5 *

## COURBES DE PROPAGATION ET DONNÉES SUR LA PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 30 MHz POUR LE SERVICE DE RADIODIFFUSION, LES SERVICES MOBILES ET LE SERVICE DE RADIOREPÉRAGE

**Radiocommunications de Terre et radiocommunications spatiales**

(1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification des services de radiodiffusion, des services mobiles ou du service de radiorepérage dans les bandes de fréquences supérieures à 30 MHz;

*b)* que des courbes de propagation peuvent être nécessaires pour déterminer la possibilité technique du partage des fréquences entre, d'une part, le service de radiodiffusion, les services mobiles et le service de radiorepérage (radiocommunications de Terre) et, d'autre part, les services de radiocommunication spatiale;

*c)* que les courbes de propagation provisoires sur ondes métriques et décimétriques indiquées pour le service de radiodiffusion dans l'Avis 370-3, bien que fondées sur un très grand nombre de résultats de mesures de champ, ne s'appliquent qu'à des climats tempérés;

*d)* que les données provisoires relatives aux services de radiodiffusion utilisant des émetteurs de satellite sur des fréquences supérieures à 10 GHz (voir le Rapport 565-1) sont valables uniquement pour certaines régions;

---

* Cette Question ainsi que les Programmes d'études qui en dérivent remplacent le Programme d'études 7A/5 qui est de ce fait annulé.

*e)* que les courbes de propagation sur ondes métriques, décimétriques et centimétriques indiquées dans l'Avis 528 pour le service mobile aéronautique ne permettent de déterminer que les valeurs médianes à long terme de l'affaiblissement de transmission de référence pour un climat continental tempéré;

*f)* que les courbes provisoires pour ondes métriques et décimétriques, relatives aux services mobiles terrestres (voir l'Avis 529 et le Rapport 567-1) s'appliquent uniquement aux climats tempérés ou à des zones particulières;

*g)* l'importance, mentionnée dans le Rapport 239-4, des méthodes fondées sur l'emploi d'ordinateurs pour prévoir le champ dans le cas du service de radiodiffusion et des services mobiles,

DÉCIDE A L'UNANIMITÉ de mettre à l'étude la question suivante:

**1.** dans quelle mesure le champ ou l'affaiblissement de transmission dépend-il de l'heure, du climat, de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain, des effets de la végétation et des bâtiments et autres constructions;

**2.** pour chaque service, quelle est la meilleure façon de présenter les réponses au § 1 ci-dessus en vue d'établir des plans de fréquences nationaux et internationaux;

**3.** quelle est la meilleure façon de présenter les réponses au § 1 ci-dessus lorsqu'il s'agit de faire appel à des ordinateurs pour établir les prévisions de champ?

*Note.* – Voir le Rapport 227-2.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 7B-1/5

## DONNÉES DE PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LA RADIODIFFUSION (Y COMPRIS LA RADIODIFFUSION PAR SATELLITE) DANS LES BANDES DE FRÉQUENCES SITUÉES AU-DESSUS DE 10 GHz

(1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que la radiodiffusion sonore et la télévision utiliseront un jour les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz, à partir d'émetteurs de Terre ou de satellites;

*b)* que les phénomènes de propagation dans ces bandes auront une influence décisive sur la planification des services de radiodiffusion;

*c)* que les données indiquées dans les Rapports 562-1 et 565-1 ont été recueillies dans certaines zones du globe,

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

**1.** enregistrement du champ ou de l'affaiblissement de transmission d'émetteurs de Terre ou de satellites pendant des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs années, en autant de régions du monde que possible;

**2.** enquêtes sur la distribution statistique du champ (dans le temps et dans l'espace);

**3.** dans le cas des émetteurs de Terre, distribution statistique du champ dans le temps en dehors de la zone de service, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de distance;

**4.** effets du climat, du terrain et de la végétation, dans le cas des trajets terrestres;

**5.** influence des bâtiments, dans le cas des trajets terrestres et spatiaux;

**6.** affaiblissement par les gaz de l'atmosphère et par les précipitations (résultats présentés sous forme statistique);

**7.** effets de la directivité des antennes;

**8.** dans le cas des émetteurs de Terre, hauteur minimale de l'antenne de réception dans les conditions urbaines et rurales;

**9.** mise au point de méthodes de calcul électronique de la fiabilité et des brouillages.

*Note.* – Voir les Rapports 565-1 et 562-1.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 7C/5

### QUESTIONS DE PROPAGATION PRÉSENTANT DE L'IMPORTANCE POUR LES SERVICES MOBILES UTILISANT DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION OU DE RADIOREPÉRAGE PAR SATELLITE

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que diverses administrations étudient des systèmes à satellite pour les besoins de la sécurité, du radiorepérage, des télécommunications et de la gestion du trafic dans les services aéronautique et maritime,

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

1. examen des facteurs de propagation qui influent sur le choix des fréquences pour les systèmes précités, compte tenu du cas où le satellite est voisin de l'horizon;

2. examen des caractéristiques de la réflexion sur la terre et sur la mer ainsi que des évanouissements causés par la propagation par trajets multiples, et de leurs effets sur les signaux de télécommunication ou de radiorepérage transmis par satellites (géostationnaires ou non) à l'usage des aéronefs et des navires.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 7D/5

### COURBES DE PROPAGATION SUR ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES DANS LA GAMME DES FRÉQUENCES COMPRISES ENTRE 30 MHz ET 1 GHz POUR LE SERVICE DE RADIODIFFUSION

(1974)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que les courbes de propagation provisoires indiquées dans l'Avis 370-3 reposent sur des données obtenues principalement en Europe et en Amérique du Nord, au moyen d'antennes d'émission et de réception situées généralement à des hauteurs de l'ordre de 300 m et de 10 m respectivement au-dessus du niveau du sol, et qu'il est nécessaire d'obtenir des renseignements, non seulement pour d'autres régions ou zones, mais aussi pour d'autres hauteurs d'antenne,

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

1. enregistrements du champ ou de l'affaiblissement de transmission sur les fréquences comprises entre 30 MHz et 1 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde ayant des conditions climatiques aussi variées que possible, et pour des distances allant jusqu'à environ 1000 km;

2. détermination des additions ou modifications à apporter aux courbes de l'Avis 370-3 pour tenir compte des effets exercés par d'autres conditions de climat, de terrain et de végétation;

3. influence des bâtiments sur la réception à faible hauteur;

4. étude particulière des problèmes posés par les trajets maritimes et par les trajets mixtes terrestres et maritimes;

5. études, pour diverses valeurs de la distance de transmission, de l'effet obtenu lorsqu'on utilise des antennes directives et des antennes dont les faisceaux sont inclinés par rapport au plan horizontal, en considérant notamment l'inclinaison pouvant découler de l'existence d'une ligne d'horizon élevée ou basse;

6. étude de la répartition statistique du champ en fonction de la position du point de réception à l'intérieur d'une zone déterminée;

7. analyses statistiques des résultats fournis par ces expériences, conformément à l'Avis 311-3, afin d'étendre le champ d'application des courbes contenues dans l'Avis 370-3;

8. établissement de méthodes de calcul par ordinateur permettant de calculer le champ ou l'affaiblissement de transmission, en vue de leur application dans la planification des services de radiodiffusion.

*Note.* – Voir le Rapport 239-4.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 7E-1/5

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 30 MHz POUR LE SERVICE MOBILE TERRESTRE

(1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification de services mobiles terrestres aux fréquences comprises entre les limites approximatives de 30 MHz et 10 GHz;

*b)* que, bien que l'on dispose à ce sujet d'un grand nombre de résultats de mesure du champ – dont certains ont été incorporés dans l'Avis 529 et le Rapport 567-1 – ces données intéressent principalement les climats tempérés ou d'autres zones;

*c)* que l'on a besoin, pour la planification des systèmes, de données de propagation plus détaillées se rapportant aux conditions des services mobiles terrestres, en raison notamment du fait que les hauteurs d'antenne ne sont pas les mêmes que dans le service de radiodiffusion,

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

1. enregistrements du champ sur les fréquences comprises entre 30 MHz et 10 GHz, plus particulièrement entre 1 et 10 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde et pour des distances allant de moins de 1 km jusqu'à environ 300 km sur des trajets terrestres et jusqu'à environ 1000 km sur des trajets maritimes. Les distributions de probabilité des emplacements, pour les hauteurs d'antenne considérées, devraient être déduites des résultats de mesure existants et de nouveaux résultats de mesure. Les hauteurs d'antenne à prendre en considération sont les suivantes: entre 10 m et 600 m au-dessus du sol pour les stations de base et entre 1 m et 10 m au-dessus du sol pour les stations mobiles;

2. établissement de méthodes d'évaluation du champ ou de l'affaiblissement de transmission en vue de la planification des assignations de fréquence pour les services mobiles, aux fréquences comprises entre environ 30 MHz et 10 GHz, compte tenu de l'influence de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain, de la végétation, des bâtiments et du climat, ainsi que de la distribution statistique, temporelle et spatiale, du champ ou de l'affaiblissement de transmission. On considérera plus spécialement les méthodes utilisables avec des ordinateurs. On tiendra compte également de l'éventuelle nécessité d'un partage des fréquences avec des stations des services de télécommunications spatiales.

*Note 1.* – Ce Programme d'études se rapporte également aux liaisons radioélectriques avec des hélicoptères.

*Note 2.* – Voir le Rapport 567-1.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 7F-1/5

## DONNÉES SUR LA PROPAGATION AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES A 30 MHz POUR LES SERVICES MOBILES AÉRONAUTIQUE ET MARITIME ET POUR LE SERVICE DE RADIOREPÉRAGE

(1974 - 1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que l'on a besoin d'appliquer des méthodes permettant d'évaluer le champ ou l'affaiblissement de transmission lorsqu'on procède à la planification des services mobiles aéronautique ou maritime ou du service de radiorepérage aux fréquences supérieures à 30 MHz;

*b)* que, bien que l'on dispose à ce sujet d'un grand nombre de résultats de mesure du champ – dont certains ont été incorporés dans les Avis 370-3 et 528 – ces données intéressent principalement les climats tempérés,

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

1. enregistrements du champ sur les fréquences supérieures à 30 MHz, plus particulièrement entre 1,5 et 16 GHz, pendant des périodes pouvant atteindre plusieurs années, dans le plus grand nombre possible de régions du monde et pour des distances allant jusqu'à environ 500 km sur des trajets terrestres et jusqu'à environ 1000 km sur des trajets maritimes. Les hauteurs d'antenne à prendre en considération sont les suivantes: entre 10 m et 1000 m au-dessus du sol pour les stations de base et entre 5 m et 20 000 m au-dessus du sol pour les stations mobiles;

2. établissement de méthodes d'évaluation du champ ou de l'affaiblissement de transmission en vue de la planification des assignations de fréquence pour les services mobile aéronautique, mobile maritime ou de radiorepérage, aux fréquences supérieures à 30 MHz, compte tenu de l'influence de la fréquence, de la polarisation, de la distance, des hauteurs d'antenne, de la nature du terrain et de l'état de la mer, de la végétation, des bâtiments et du climat, ainsi que de la distribution statistique, temporelle et spatiale, du champ ou de l'affaiblissement de transmission. On considérera plus spécialement les méthodes utilisables avec des ordinateurs. On tiendra compte également de l'éventuelle nécessité d'un partage des fréquences avec des stations des services de télécommunications spatiales.

---

## PROGRAMME D'ÉTUDES 8A/5 *

## CARACTÉRISTIQUES DE LA PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LA RÉGION LA PLUS ÉLEVÉE DU SPECTRE DES FRÉQUENCES RADIOÉLECTRIQUES, AINSI QUE DANS L'INFRAROUGE ET LA LUMIÈRE VISIBLE

(1978)

Le CCIR,

CONSIDÉRANT

que la Question 53/1 envisage la possibilité d'utiliser des fréquences beaucoup plus élevées que 300 GHz pour les télécommunications,

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

facteurs de propagation qui conditionnent la possibilité d'utiliser de telles fréquences pour des systèmes mettant en jeu les transmissions dans l'espace et à travers l'atmosphère.

---

## DÉCISION 3-2

## PRÉVISION DE LA PHASE ET DE L'AMPLITUDE DE L'ONDE DE SOL

(1970 - 1974 - 1976 - 1978)

La Commission d'études 5 du CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* qu'il y a lieu d'élaborer de meilleures méthodes de prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol propagée au-dessus de la Terre (voir les Questions 1-2/5 et 3-2/5);

*b)* que les effets troposphériques sont importants dans les prévisions de la phase (instant d'arrivée) des signaux qu'utilisent les systèmes de radiolocalisation de grande précision,

DÉCIDE

1. qu'on doit maintenir le Groupe de travail intérimaire 5/1 chargé d'examiner l'application pratique des données météorologiques, topographiques et géologiques à la prévision de la phase et de l'amplitude de l'onde de sol spécialement aux fréquences inférieures à 30 MHz environ, qui se propagent au-dessus de la surface de la Terre et dans les régions non ionisées de l'atmosphère;

2. que le Groupe de travail intérimaire devra proposer d'apporter des amendements aux textes existants de la Commission d'études 5 ou aux nouveaux textes, suivant les cas;

3. que le Groupe de travail intérimaire devra rédiger un Rapport indépendant sur les méthodes d'évaluation des constantes équivalentes du sol en s'intéressant particulièrement aux méthodes utilisant les mesures d'affaiblissement et les mesures d'inclinaison de l'onde;

4. que le Groupe de travail intérimaire devra s'efforcer d'établir des cartes de conductivité destinées à un Atlas mondial de la conductivité du sol et de ses variations saisonnières s'il y a lieu;

5. que le Groupe de travail intérimaire sera composé de membres désignés par les Administrations des pays suivants: Etats-Unis d'Amérique, Royaume-Uni, Suède, France, Norvège, Algérie, République Argentine, Finlande, Nouvelle-Zélande ainsi que de l'UER;

---

* Dérive de la Question 53/1.

6. qu'autant que possible, le travail de ce Groupe soit fait par correspondance;

7. que ses travaux seront coordonnés par un représentant désigné par l'Administration de la Suède;

8. que le Groupe de travail intérimaire collaborera, pour l'étude des questions qui les intéressent tous deux, avec le Groupe de travail intérimaire 5/3 institué aux termes de la Décision 5-2.

*Note.* – Voir les Rapports 716 et 717.

---

## DÉCISION 4-1

### DONNÉES RELATIVES A LA PROPAGATION TROPOSPHÉRIQUE POUR LA RADIODIFFUSION, LES TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET LES LIAISONS ENTRE POINTS FIXES

(1963 - 1970 - 1974 - 1976)

La Commission d'études 5 du CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* que les données relatives à la propagation, pour l'établissement des services de radiodiffusion (notamment de radiodiffusion par satellite) et des services mobiles, doivent être tenues à jour;

*b)* qu'il est également nécessaire de connaître les facteurs de propagation troposphérique affectant la conception des systèmes de faisceaux hertziens et le partage des bandes de fréquences entre ces derniers, ainsi qu'entre les systèmes de télécommunication spatiale et de Terre (voir le Programme d'études 5D-3/5),

DÉCIDE

1. que le Groupe de travail intérimaire 5/2 doit poursuivre l'étude de toutes les méthodes permettant de déterminer, avec autant d'exactitude et de concision que possible, et sous une forme qui permette aux ingénieurs des radiocommunications d'appliquer aisément ces méthodes, l'affaiblissement de transmission pour les systèmes de télécommunication entre points fixes, les services de radiodiffusion et les services mobiles, en tenant compte de la nécessité de déterminer les caractéristiques de fiabilité de ces systèmes et leur vulnérabilité au brouillage;

2. que ce Groupe de travail proposera des amendements à apporter aux textes existants de la Commission d'études 5 ou, le cas échéant, proposera de nouveaux textes;

3. que ce Groupe se compose de membres désignés par les Administrations de la République fédérale d'Allemagne, du Canada, de la Chine (République Populaire de), des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, de l'Italie, du Japon, des Pays-Bas, du Royaume-Uni, de la Suède, de l'U.R.S.S., ainsi que de l'Agence spatiale européenne et de l'IFRB, et que la coordination de ses travaux soit confiée au représentant du Royaume-Uni;

4. que ce Groupe travaille en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire 5/3 créé en application de la Décision 5-2;

5. qu'autant que possible, le travail de ce Groupe soit fait par correspondance;

6. que ce Groupe présente les rapports appropriés avant les Assemblées plénières du CCIR.

---

## DÉCISION 5-2

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

(1963 - 1970 - 1974 - 1976 - 1978)

La Commission d'études 5 du CCIR,

CONSIDÉRANT

*a)* qu'il convient de tenir à jour les données présentées dans les Rapports de la Section C du présent Volume 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 2-3/5) pour les études de radiométéorologie dans divers climats;

*c)* qu'il est nécessaire, pour l'établissement des systèmes de télécommunication spatiale, de connaître les caractéristiques de l'absorption, de la réfraction et du bruit céleste (voir le Programme d'études 5A-3/5),

DÉCIDE

1. que le Groupe de travail intérimaire 5/3 doit poursuivre l'examen de toutes les données météorologiques pouvant intéresser la propagation des ondes radioélectriques dans les régions non ionisées de l'atmosphère;

2. que ce Groupe de travail proposera des amendements à apporter aux Rapports existants de la Section C du présent Volume ou, le cas échéant, en proposera de nouveaux;

3. que ce Groupe sera composé de membres désignés par les Administrations de la République fédérale d'Allemagne, du Canada, de la Chine (République Populaire de), du Danemark, des Etats-Unis d'Amérique, de la France, de l'Inde, de l'Italie, du Japon, des Pays-Bas, du Royaume-Uni, de la Suède et de l'U.R.S.S., et que la coordination de ses travaux sera confiée à un membre désigné par l'Administration italienne;

4. que ce Groupe doit travailler en étroite collaboration avec le Groupe de travail intérimaire 5/2 institué aux termes des dispositions de la Décision 4-1;

5. que, dans toute la mesure possible, les travaux du Groupe doivent s'effectuer par correspondance;

6. que ce Groupe présente les rapports appropriés avant les Assemblées plénières du CCIR.

ISBN 92-61-00702-3