



HAL
open science

Analyse des conditions de propagation à 20 et 30 GHz en Europe

J. Tiffon

► **To cite this version:**

J. Tiffon. Analyse des conditions de propagation à 20 et 30 GHz en Europe. [Rapport de recherche] Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1982, 57 p., figures, graphiques. hal-02191781

HAL Id: hal-02191781

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191781>

Submitted on 23 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RP

782

(52)

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**CENTRE DE
RECHERCHES
EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT
TERRESTRE
ET PLANETAIRE**

CRPE

**NOTE TECHNIQUE
CRPE / 122**

**ANALYSE DES CONDITIONS DE PROPAGATION
A 20 ET 30 GHZ EN EUROPE.**

Par **J.TIFFON**

**RPE / ETP
38-40 rue du Général Leclerc
92131 ISSY LES MOULINEAUX, FRANCE**

145



30 MAI 1983

LISTE DE DIFFUSION NT/CRPE/122

1) Liste de diffusion systématique

2) Liste de diffusion complémentaire

CNET

CNET

MM. POITEVIN Directeur du CNET
 DU CASTEL Directeur Adjoint
 du CNET
 COLONNA Adjoint militaire
 au Directeur du CNET
 VINCENT-
 CARREFOUR Directeur des programmes
 BLOCH DICET
 LEMEZEC DICET
 THUE DICET
 HANBABA LAB/MER/SPI
 LASSUDRIE LAB/MER
 DUBOS PAB
 MM. REVAH PAB/RPE
 BAUER
 AMAYENC
 BAUDIN
 BERTHELIER
 BERTIN
 BLANC
 Mme CORNILLEAU
 MM. DE JAVEL
 DE LA PORTE
 Mme ETCHETO
 MM. ETCHETO
 GENDRIN
 HIGEL
 LAVERGNAT
 MEYER
 MON
 NUTTEN
 Mme PERRAUT
 MM. ROORYCK
 ROUX A.
 SALIOU
 SAUVAGET
 TESTUD
 VIDAL MADJÄR
 WEILL

MM. ROZENWAIG PAA/CLC
 MAINGUENAUD PAA/TPA
 BOITHIAS PAB
 LANGER PAB
 PAYET PAB
 LOMBARD PAB/ETR
 BATTESTI PAB/ETR
 FERNANDEZ PAB/ETR/PHZ (2)
 ROUFFET PAB/ETR/SMC
 BERNARD A. PAB/ETR/SMC
 FOUAD HANNA PAB/ETR/HYP
 MONNOT PAB/ETR/CEM
 FARGES PAB/STC/ATE
 SYLVESTRE PAB/STC/ATE
 Mme JUY PAB/RPE/ETP
 MM. TIFFON PAB/RPE/ETP
 DJEBARI LAA/ELR/DNP
 LE FAOU LAB/SER/MAG
 DUPUIS LAB/MER
 BOULOARD LAB/MER/STA
 GAY LAB/MER/STA
 LE LIGNE LAB/MER/STA
 PERON LAB/MER/STA
 RENAN LAB/MER/STA
 DRUAIS LAB/MER/TSF
 PAUGAM LAB/ICM/TOH (2)
 GOURONNEC LAB/ROC/FCO
 LEGER RENNES/SGC/PCV

EXTERIEURS

MM. BRUXELLES CERNAT (2)
 DECOURTRAY DTRE/CTS
 DJETE DGT-ABIDJAN (2)
 HAGENBUCHER THOMSON-CSF (2)

Bibliothèques SDI (2)
 EDB
 RPE (7)

CNRS
 Bibliothèques PARIS
 LPCE (Orléans)



**CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE**

NOTE TECHNIQUE CRPE/122

**ANALYSE DES CONDITIONS DE PROPAGATION
A 20 ET 30 GHZ EN EUROPE**

par

J. TIFFON

RPE/ETP

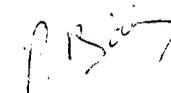
38-40 rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX, FRANCE



Le Directeur


I. REVAH

Le Directeur Adjoint


P. BAUER

novembre 1982

AVERTISSEMENT

L'analyse de propagation présentée dans cette note technique répond à la demande formulée par la Société THOMSON-CSF de traiter la sous-tâche 2330 "Analyse des conditions de propagation" du projet de l'Agence Spatiale Européenne "Etude des configurations d'un système de satellites et d'une charge utile pour services de communication à large bande" (Commande THOMSON-CSF Division Espace, département Espaces-Satellites n° 390.130.395 du 02.07.1982). L'objectif de ce contrat était de fournir une analyse détaillée des conditions de propagation à 20/30 GHz et des contraintes qu'elles imposent aux systèmes, notamment en ce qui concerne les marges.

I INTRODUCTION

II DONNEES DISPONIBLES

II.1 Pluviométrie

II.2 Propagation

III METHODES DE PREVISION DE L'AFFAIBLISSEMENT PAR LA PLUIE

III.1 Principe des méthodes de prévision

III.2 Méthode de Misme-Waldteufel

III.3 Méthode du CCIR

III.4 Méthode de Boithias-Battesti

III.5 Choix d'une méthode de prévision

III.5.1. Bases de la comparaison

III.5.2. Comparaison à 12 GHz

III.5.3. Comparaison à 20 et 30 GHz

III.5.4. Transposition en fréquence

IV TRANSPOLARISATION

V COURBES D'AFFAIBLISSEMENT ET DE TRANSPOLARISATION

IV.1 Choix des paramètres

IV.2 Courbes d'affaiblissement

IV.3 Courbes de transpolarisation

VI RECEPTION EN DIVERSITE D'EMPLACEMENT

BIBLIOGRAPHIE

I - INTRODUCTION

Sur un trajet Terre-Satellite à 20 et 30 GHz, l'absorption et la diffusion des ondes par les hydrométéores (pluie, grêle, neige, cristaux de glace, brouillards ...) provoquent des baisses de niveau du signal reçu (affaiblissements), des rotations du plan de polarisation des ondes (dépolariation), des scintillations de phase et d'amplitude. Ces phénomènes contribuent à la dégradation de la qualité des liaisons.

Pour les liaisons où une seule polarisation est utilisée, seule la pluie (exceptionnellement la neige) peut provoquer des affaiblissements qui affectent la disponibilité de la liaison.

Dans le cas de systèmes fonctionnant en réutilisation de fréquence sur deux polarisations croisées, la connaissance du découplage de polarisation est essentielle.

La réception en diversité d'emplacement permet d'améliorer la qualité des liaisons pendant les périodes où la propagation est perturbée.

Les objectifs de cette étude sont donc d'établir des caractéristiques prévisibles de propagation (affaiblissement par la pluie, découplage de polarisation, gain apporté par la réception en diversité d'emplacement) dans les bandes de fréquence de 20 et 30 GHz pour des liaisons Terre - Satellite entre un satellite géostationnaire et un point quelconque en Europe. Ces caractéristiques seront établies à la fois à partir des données disponibles, des méthodes de prévision et des lois de transposition en fréquence généralement admises.

Les données nécessaires à cette étude sont d'une part les données de pluviométrie qui décrivent le phénomène perturbateur et d'autre part les données de propagation qui décrivent les perturbations, c'est-à-dire les affaiblissements et les découplages de polarisation.

II - DONNEES DISPONIBLES

II.1. Pluviométrie

Les données de pluviométrie nécessaires à l'analyse de propagation sont les répartitions d'intensité de précipitation sur une minute pour une année moyenne. Les données dont nous disposons, à l'échelle de l'Europe, proviennent de deux sources :

- Le rapport 563-1 (MOD F) du CCIR [1] qui délimite des zones hydro-météorologiques pour lesquelles on donne la répartition des intensités de précipitation pour des pourcentages du temps compris entre 1 et 0,001.

Il est alors possible d'établir des courbes d'affaiblissement de propagation pour chacune des zones couvrant l'Europe.

- Les cartes établies à l'Université de Bradford pour l'ESA [2] qui donnent les contours de l'intensité des précipitations sur une minute pour différents pourcentages du temps. Ces cartes qui couvrent l'Europe sont beaucoup plus précises que le découpage en zones du CCIR. Cependant les deux approches utilisées conduisent par endroit à des écarts importants. Ainsi, dans la région de Bergen (Norvège), où apparaît un maximum, l'intensité dépassée pour 0,01 % du temps est de 40 mm/h ou de 70 mm/h selon le modèle utilisé.

Actuellement nous ne disposons pas de la dernière version des cartes d'intensité de précipitation établies par l'Université de Bradford qui devraient permettre de définir avec plus de précision les limites des zones établies par le CCIR.

De plus, l'établissement de cartes d'affaiblissement de propagation sur les trajets Terre - Satellite, à partir des cartes de pluviométrie est en cours à l'Université de Bradford. Des résultats préliminaires ont été présentés dans le document [2]. Nous ne connaissons pas l'état d'avancement de ces travaux, mais les résultats auxquels on peut s'attendre seront

beaucoup plus précis que ceux fournis par la présente étude où nous nous limiterons à l'utilisation des données pluviométriques du CCIR.

La région européenne concernée par cette étude et dont les limites sont précisées au paragraphe IV.1. est couverte par les six zones E, G, H, J, K, L sur la figure 1 (on ne tiendra pas compte des zones entièrement maritimes A et F). Les intensités de précipitation, pour des pourcentages de temps compris entre 1 et 0,001 sont représentées sur le tableau de la figure 2.

Dans la suite, nous établirons des courbes de propagation pour chacune de ces six zones.

II.2. Propagation

Les données de propagation nécessaires aux systèmes de télécommunication spatiale et dont nous pouvons disposer sont de trois sortes :

- les données recueillies par des mesures directes sur des signaux émis par des balises embarquées sur des satellites (ATS 6, OTS et SIRIO pour l'Europe, ATS 5, ATS 6, CTS, COMSTAR, ETS II, CS pour le reste du monde),

- les données recueillies par des mesures directes sur des signaux solaires (radiomètres solaires).

- les données recueillies par des mesures indirectes sur le bruit céleste (radiomètres).

Nous disposons ainsi de données provenant de 81 stations réparties dans le monde dont 23 en Europe. Ces données recensées par le CCIR [3], se rapportent à des fréquences comprises entre 9,4 GHz et 37 GHz.

Cependant ces mesures radioélectriques n'ont pas toutes été accompagnées des mesures d'intensité de précipitation qui sont nécessaires pour valider les méthodes de prévision de l'affaiblissement par la pluie.

Les données de propagation sont nombreuses dans la bande des 12 GHz mais elles sont en nombre nettement insuffisant dans les bandes de fréquences supérieures. Ainsi pour l'Europe, nous ne disposons pratiquement que des données provenant des mesures radiométriques à 20 et 30 GHz effectuées en France et en Grande-Bretagne. Les mesures à partir du satellite ATS 6 à 20 et 30 GHz en Europe n'ont eu lieu que pendant un faible nombre d'heures au cours de la période d'août 1975 à juillet 1976 caractérisée par une pluviosité particulièrement faible. Ces mesures ont cependant montré, dans la gamme des affaiblissements déduits des mesures radiométriques avec une précision suffisante, une bonne correspondance entre les affaiblissements mesurés simultanément à partir des radiomètres et des stations terriennes [4].

III - METHODES DE PREVISION DE L'AFFAIBLISSEMENT PAR LA PLUIE

III.1-Principe des méthodes de prévision

Differentes méthodes ont été proposées pour prévoir la statistique de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet terre-satellite à partir des mesures du taux de précipitation au voisinage du trajet. Ces méthodes sont dérivées de celles utilisées pour les trajets horizontaux, elles font toutes usage de la relation $\nu_R = kR^\alpha$ entre l'affaiblissement linéique ν_R (dB/km) et le taux de précipitation R (mm/h), qui dépend de la microstructure des précipitations et elles utilisent la distribution cumulative du taux de précipitation en un point.

Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories. La première englobe les méthodes basées sur la modélisation spatiale et temporelle de la pluie. Dans la deuxième on utilise une "distance équivalente" d_e du trajet oblique, l'affaiblissement est celui qui serait produit par une pluie d'intensité uniforme R tombant sur une liaison de longueur d_e .

Parmi les méthodes existantes nous avons considéré les méthodes élaborées en Europe qui sont à priori les mieux adaptées au climat européen. Il s'agit de la méthode de Misme et Waldteufel qui entre dans la première catégorie et pour la deuxième catégorie de la méthode adoptée par le CCIR et de la méthode de Boithias et Battesti.

III.2 Méthode de Misme et Waldteufel

La méthode de Misme et Waldteufel [5,6] permet de calculer la fonction de répartition des affaiblissements $P(A > A_0)$ en utilisant une cellule de pluie de forme cylindrique à l'intérieur de laquelle l'intensité de pluie R est uniforme et une distribution log normale $p(R)$ des intensités de précipitation.

La fonction de répartition des affaiblissements s'écrit :

$$P(A > A_0) = \int_{R_{\min}}^{\infty} a(R) p(R) dR$$

où $a(R)$ est le facteur par lequel il faut multiplier la probabilité $p(R)$ que l'intensité R soit observée en un point donné de la liaison pour obtenir la probabilité que l'intensité R soit observée en un point quelconque de la liaison.

La distribution log normale des intensités de précipitation est déterminée par les intensités de pluie observées pour $5 \cdot 10^{-4}$ et $5 \cdot 10^{-5}$ du temps. Pour les pays européens les données de pluviométrie sont abondantes mais elles sont généralement fragmentaires et on ne connaît pas toujours les intensités de précipitation pour des fractions du temps inférieures à 10^{-4} ; c'est le cas des répartitions données pour les zones hydrométéorologiques délimitées par le CCIR. Dans certains cas l'extrapolation des valeurs d'intensité de précipitation pour les faibles pourcentages du temps peut conduire à des erreurs importantes.

III.3 Méthode du CCIR

La méthode adoptée par le CCIR est celle décrite dans le rapport 564-1 (mod F) [3]. Elle utilise l'intensité réelle de pluie $R_{0,01}$ pour 0,01 % du temps et une distance équivalente d_e calculée à l'aide des paramètres suivants :

- h_0 : altitude de la station terrienne par rapport au niveau moyen de la mer (km)
- θ : angle de site (en degrés)
- ϕ : latitude de la station terrienne (en degrés)

La figure 3 représente schématiquement un trajet Terre Satellite avec les paramètres relatifs au processus de prévision de l'affaiblissement. La méthode CCIR comporte les phases suivantes :

- 1) Calcul de la hauteur de précipitation, h_R , à l'aide de la formule

$$h_R = 5,1 - 2,15 \log \left(1 + 10 \frac{(\phi - 27)}{25} \right) \quad \text{km} \quad (1)$$

Il convient de multiplier cette hauteur h_R par le coefficient de réduction C tel qu'il a été défini par le groupe IWP 5/2 du CCIR réuni à Genève fin Mai 82.

$C = 0,6$ pour $\phi < 20^\circ$

$C = 0,6 + 0,02 (\phi - 20^\circ)$ pour $20^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$

$C = 1$ pour $\phi > 40^\circ$

2) Calcul de la longueur du trajet oblique, L_s , en dessous de la hauteur de précipitation, d'après la formule :

$$L_s = \frac{2 (h_R - h_0)}{\left(\sin^2 \theta + 2 \frac{(h_R - h_0)^{0,5}}{R_e} \right) + \sin \theta} \quad \text{km} \quad (2)$$

R_e étant le rayon équivalent de la Terre (8500 km).

Pour $\theta \geq 10^\circ$ l'équation (2) peut être simplifiée :

$$L_s = \frac{(h_R - h_0)}{\sin \theta} \quad \text{km} \quad (3)$$

3) Calcul de la distance équivalente, d_e , à l'aide de la formule

$$d_e = \frac{L_s}{1 + bL_s}$$

où $b = \frac{4}{90} \cos \theta$ pour un pourcentage de temps égal à 0,01

4) Calcul de l'affaiblissement linéique γ_R pour un pourcentage de temps égal à 0,01 à l'aide de l'intensité de précipitations $R_{0,01}$ pour ce même pourcentage du temps et des coefficients k et α en utilisant la formule.

$$\gamma_R = k (R_{0,01})^\alpha$$

Les coefficients k et α qui dépendent de la fréquence et de la polarisation sont indiqués dans le Rapport 721 (MOD I) du CCIR et reproduits sur le tableau de la figure 4.

5) Calcul de l'affaiblissement dépasse pour 0,01 % d'une année moyenne à l'aide de la formule suivante :

$$A_{0,01} = \gamma_R d_e$$

6) On peut estimer l'affaiblissement qui doit être dépassé pour d'autres pourcentages d'une année moyenne, entre 0,001 % et 0,1 %, à partir de l'affaiblissement qui doit être dépassé pour 0,01 % d'une année moyenne en utilisant la formule :

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-a}$$

où

$$a = 0,33 \quad 0,001 \leq p \leq 0,01$$

$$a = 0,41 \quad 0,01 < p \leq 0,1$$

Cette méthode adoptée par le CCIR est d'un emploi facile et ne nécessite du point de vue hydrométéorologique que la connaissance de l'intensité de précipitation $R_{0,01}$ pour un pourcentage du temps égal à 0,01. En contrepartie l'affaiblissement A_p pour un pourcentage p quelconque est indépendant de l'intensité de précipitation R_p ce qui peut conduire à des erreurs importantes dans certains cas.

III.4 Méthode de Boithias et Battesti

La méthode de Boithias et Battesti [7] utilise l'intensité réelle de pluie R et une distance équivalente, d_e , du trajet oblique. Les paramètres utilisés ont la même signification que précédemment. La méthode comporte les phases suivantes :

1) Calcul de la hauteur de précipitation, h_R , à l'aide de la formule :

$$h_R = 5 \cos \phi - 0,8 \cos 3 \phi$$

2) Calcul de la longueur du trajet oblique, L_S , en dessous de la hauteur de précipitation comme dans la méthode du CCIR .

3) Calcul de la distance équivalente, d_e , à l'aide de la formule :

$$d_e = \frac{L_S}{1 + 0,025 \left(\log \frac{2}{p} \right)^{1,7} L_S^{0,9}}$$

4) Calcul de l'affaiblissement linéique γ_R en fonction du pourcentage de temps p à l'aide de l'intensité de précipitation R_p et des coefficients k et α

$$\gamma_R = k (R_p)^\alpha$$

5) Calcul de l'affaiblissement dépassé pour un pourcentage du temps p , à l'aide de la formule

$$A_p = \gamma_R d_e$$

La méthode de Boithias et Battesti diffère principalement de celle adoptée par le CCIR par l'utilisation d'une distance équivalente fonction du pourcentage de temps et l'utilisation de la répartition des intensités de précipitation (déduite de mesures ou issue d'un modèle).

III.5 Choix d'une méthode de calcul des affaiblissements prévisibles

III.5.1 Bases de la comparaison

Pour choisir une méthode de calcul de l'affaiblissement par la pluie parmi les trois méthodes citées précédemment (Misme - Waldteufel, CCIR et Boithias-Battesti) on a utilisé les données de propagation disponibles dans les bandes de fréquence de 12, 20 et 30 GHz. Pour différents pourcentages du temps on a comparé les affaiblissements déduits des mesures aux affaiblissements calculés à l'aide des méthodes de prévision en utilisant les intensités de précipitation mesurées.

- Dans les cas où les mesures radioélectriques n'ont pas été accompagnées de mesures d'intensité de précipitation (environ un cas sur deux) on a utilisé les intensités caractéristiques d'une année moyenne dans la zone hydrométéorologique CCIR correspondante. La comparaison des valeurs d'affaiblissements mesurés et calculés perd alors de sa signification puisque les mesures d'affaiblissement ont lieu en général durant des périodes trop courtes

pour que leur pluviométrie soit voisine de celle d'une année moyenne.

- Les pourcentages de temps utilisés pour cette comparaison sont égaux à 0,1, 0,01 et 0,001. Toutefois, les valeurs expérimentales sont environ deux fois plus nombreuses pour 0,01 % que pour les autres pourcentages de temps.

- Les données européennes ne sont relativement nombreuses que dans la bande des 12 GHz. On a représenté sur la figure 5 la liste des stations européennes pour lesquelles on a des données à 12 GHz.

- La liste des stations ayant fourni des données à 20 GHz et 30 GHz est représentée sur la figure 6. Les seules données européennes effectuées sur des durées suffisamment longues ont été recueillies en France et en Grande Bretagne à l'aide de radiomètres. Les données provenant de mesures de longue durée sur des signaux émis par des balises embarquées sur des satellites n'ont jusqu'à présent été recueillies qu'aux USA et au Japon. Comme les caractéristiques pluviométriques de ces pays sont différentes de celles des pays européens on s'attend à trouver une grande dispersion des valeurs d'affaiblissement calculées par les méthodes de prévision élaborées pour les climats européens par rapport aux valeurs mesurées.

III.5.2 Comparaison à 12 GHz

On a d'abord effectué la comparaison entre les affaiblissements calculés et mesures à 12 GHz (figure 7) pour les stations situées en Europe où des mesures d'intensité de précipitation ont été effectuées simultanément aux mesures de propagation. Parmi les données disponibles à 12 GHz celles-ci permettent de tester efficacement les méthodes de prévision.

Les méthodes CCIR et Boithias-Battesti donnent des affaiblissements identiques pour 0,01 % du temps et des affaiblissements très voisins pour 0,1 % et 0,001 % du temps. Tous ces affaiblissements calculés sont inférieurs aux affaiblissements mesurés. Dans 9 cas sur 10 environ les valeurs calculées en dB sont comprises entre les valeurs mesurées et celles ci diminuées de 40 % (en dB).

La méthode de Misme-Waldteufel donne des valeurs d'affaiblissement aussi dispersées que celles des précédentes méthodes mais plus proches de celles mesurées pour les trois pourcentages de temps considérés. Dans 9 cas sur 10 environ les affaiblissements calculés sont compris entre - 20 et + 20 % de l'affaiblissement mesuré (en dB).

On peut donc en conclure que la méthode de Misme-Waldteufel est la mieux adaptée à la prévision des affaiblissements par la pluie sur les trajets Terre-Satellite en Europe à 12 GHz.

Toutefois, le nombre de cas étudiés étant très limité on a établi la comparaison sur l'ensemble des données européennes disponibles à 12 GHz (figure 8 à 10) c'est à dire en incluant les données de propagation qui ne sont pas accompagnées de données pluviométriques.

Les méthodes CCIR et Boithias Battesti donnent des affaiblissements identiques pour 0,01 % du temps (figure 9) et souvent voisins pour 0,1 % et 0,001 % (figures 8 et 10). Dans 9 cas sur 10, ces affaiblissements calculés sont compris entre - 40 % et + 40 % autour de la valeur mesurée (en dB) pour 0,01 % et 0,001 % et entre - 50 % et + 50 % autour de la valeur mesurée pour 0,1 % du temps.

La méthode de Misme-Waldteufel donne dans la plupart des cas des valeurs d'affaiblissement plus élevées que les deux autres méthodes. Ces valeurs sont comprises dans les mêmes fourchettes autour des valeurs mesurées sauf pour 0,01 % du temps (figure 9) où les valeurs calculées par la méthode de Misme Waldteufel varient peu, elles sont pratiquement toutes comprises entre 5,5 dB et 6,5 dB alors que les valeurs mesurées sont comprises entre 2 dB et 7 dB.

Pour les fréquences dans la bande des 12 GHz, où les mesures sont les plus nombreuses, on voit que les trois méthodes de prévision de l'affaiblissement par la pluie donnent des résultats assez dispersés.

III.5.2 Comparaison à 20 et 30 GHz

Sur les figures 11 et 12 on a représenté la corrélation entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées à 20 GHz pour des pourcentages de temps égaux à 0,1 et 0,01. Les valeurs calculées par les méthodes CCIR et Boithias-Battesti sont plus espacées à 20 GHz qu'à 12 GHz. La méthode de Misme-Waldteufel donne dans la plupart des cas des valeurs plus élevées que les deux autres méthodes.

Pour 0,1 % du temps (figure 11) et dans 9 cas sur 10 environ, les valeurs calculées sont réparties autour des valeurs mesurées dans les fourchettes suivantes (en dB) :

- de + 50 % à - 20 % pour la méthode CCIR
- de + 20 % à - 50 % pour la méthode Boithias-Battesti
- de + 50 % à - 20 % pour la méthode Misme-Waldteufel

Pour 0,01 % du temps (figure 12) et toujours dans 9 cas sur 10, les valeurs calculées sont réparties autour des valeurs mesurées dans les fourchettes suivantes (en dB) :

- de + 30 % à - 35 % pour les méthodes CCIR et Boithias-Battesti
- de + 50 % à - 35 % pour la méthode Misme-Waldteufel

Sur la figure 13 on a représenté la corrélation entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées à 30 GHz pour des pourcentages de temps égaux à 0,1 et 0,01. Les valeurs calculées par les méthodes CCIR et Boithias Battesti sont très proches et celles calculées par la méthode Misme Waldteufel sont plus grandes. Dans 9 cas sur 10 les valeurs calculées sont réparties autour des valeurs mesurées dans les fourchettes suivantes (en dB) :

- de + 20 % à - 35 % pour la méthode CCIR
- de + 20 % à - 45 % pour la méthode Boithias-Battesti
- de + 140 % à - 25 % pour la méthode Misme Waldteufel

De cette étude comparative on peut tirer les conclusions suivantes :

- La méthode de Misme-Waldteufel donne de bons résultats à 12 GHz mais des valeurs d'affaiblissement trop forts à 20 GHz et surtout à 30 GHz.
- Les méthodes CCIR et Boithias Battesti donnent des valeurs d'affaiblissement souvent voisines, celles de la méthode Boithias-Battesti étant généralement plus faibles que celles de la méthode CCIR.
- La méthode CCIR donne les valeurs les mieux réparties autour des valeurs mesurées.

En conséquence nous utiliserons la méthode CCIR pour établir les courbes de prévision d'affaiblissement à 20 et 30 GHz. Cette méthode présente de plus l'avantage de sa simplicité d'emploi puisqu'au point de vue hydrométéorologique elle ne nécessite la connaissance des intensités de précipitation que pour 0,01 % du temps.

III.5.4 Transposition en fréquence

Pour pallier le manque de données d'affaiblissement par la pluie en Europe à 20 et 30 GHz, il est possible de transposer à ces fréquences les affaiblissements mesurés à 12 GHz en utilisant les lois d'échelle en fréquence généralement admises. Différents auteurs ont proposé des relations de transposition en fréquence.

Drufuca [3] a constaté expérimentalement qu'entre 11 GHz et 19 GHz les affaiblissements A_1 et A_2 aux fréquences F_1 et F_2 étaient reliées par la relation approchée

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^{1.72}$$

Les données de propagation du satellite COMSTAR à 19 GHz et 28 GHz ont permis à Cox et Arnold [9] de relier les affaiblissements par la relation approchée

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2$$

Bien qu'en réalité la variation d'affaiblissement soit légèrement inférieure à celle de la loi en F^2 , l'erreur commise en utilisant cette loi est largement inférieure aux variations d'affaiblissement mesurées d'une année sur l'autre.

Battesti [10] a proposé la relation

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{F_2 - 6}{F_1 - 6}$$

Pour les fréquences F_1 et F_2 comprises entre 11 et 20 GHz et la

relation
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{F_2 - 10}{F_1 - 10}$$

pour les fréquences F_1 et F_2 comprises entre 20 et 50 GHz.

Lorsque la fréquence F_1 est inférieure à 20 GHz et la fréquence F_2 supérieure à 20 GHz, on utilise la relation

$$\frac{A_2}{A_1} = 1,4 \frac{F_2 - 10}{F_1 - 6}$$

Une relation approchée purement empirique donne des résultats très voisins de ceux donnés par l'ensemble des trois relations précédentes pour des fréquences de 8 à 50 GHz. Cette relation est la suivante :

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{F_2^{1,75} - 3,1 \cdot 10^{-7} F_2^{5,2}}{F_1^{1,75} - 3,1 \cdot 10^{-7} F_1^{5,2}}$$

Le tableau suivant donne les valeurs des rapports d'affaiblissement à 12, 20 et 30 GHz calculés à l'aide des relations précédentes :

	A_{20}/A_{12}	A_{30}/A_{20}	A_{30}/A_{12}
Drufuca	2,41		
Cox		2,25	
Battesti	2,33	2,0	4,67

En utilisant les lois d'échelle en fréquence on peut transposer à 20 et 30 GHz les valeurs d'affaiblissement mesurées à 12 GHz et les comparer aux valeurs calculées par la méthode du CCIR. Dans cette méthode, l'affaiblissement calculé ne dépend de la fréquence que par les coefficients k et de la relation entre l'affaiblissement linéique γ_R et l'intensité de précipitation $R_{0,01}$ pour 0,01 % du temps.

$$\gamma_R = K \left(R_{0,01} \right)^\alpha$$

Il en résulte que dans cette méthode les affaiblissements A_1 et A_2 calculés pour des fréquences F_1 et F_2 sont liés par la relation

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{K_2}{K_1} \left(R_{0,01} \right)^{(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

Le rapport A_2/A_1 varie avec la fréquence, la polarisation et $R_{0,01}$. Pour l'Europe $R_{0,01}$ varie de 22 mm/h pour la zone E à 60 mm/h pour la zone L. On peut donc calculer les limites de variation du rapport A_2/A_1 pour

12, 20 et 30 GHz. Ces valeurs sont données sur le tableau suivant pour une polarisation circulaire.

$R_{0,01}$ mm/h	A_{20}/A_{12}	A_{30}/A_{20}	A_{30}/A_{12}
22	2,74	1,97	5,39
60	2,42	1,83	4,42

Ces valeurs de A_2/A_1 sont très proches de celles données par les lois d'échelle en fréquence citées plus haut. La comparaison des valeurs d'affaiblissement transposées (à 20 et 30 GHz à partir des mesures à 12 GHz) aux valeurs calculées à ces mêmes fréquences par la méthode du CCIR, conduirait aux mêmes conclusions que la comparaison à 12 GHz faite au paragraphe III.5.2. Il n'y a donc pas lieu de recourir aux lois d'échelle en fréquence pour augmenter le nombre des données disponibles.

IV - TRANSPOLARISATION

Dans les systèmes fonctionnant en réutilisation de fréquence, on utilise des polarisations orthogonales (rectilignes ou circulaires) pour permettre la transmission de deux voies radioélectriques indépendantes sur la même fréquence et le même trajet. Le fonctionnement de ces systèmes peut être perturbé par les phénomènes de transpolarisation qui apparaissent au cours de la propagation des ondes dans l'atmosphère. La transpolarisation est principalement due aux hydrométéores (pluie et nuages de glace) [11].

En ce qui concerne la transpolarisation due à la pluie, des méthodes de prévision semi-empiriques du rapport de discrimination (XPD) ont été établies sur la base de théories générales relatives à des milieux de pluie avec gouttes orientées aléatoirement. Dans ces méthodes, les paramètres sont ajustés pour concorder approximativement avec les données expérimentales.

Nous utiliserons la relation ci-dessous adoptée par le CCIR (Rapport 722 MOD F). Elle relie le rapport de discrimination (XPD) à l'affaiblissement copolaire (CPA) pour des fréquences F comprises entre 15 et 35 GHz.

$$\begin{aligned} \text{XPD} &= 30 \log F - 40 \log (\cos\theta) + k^2 - 10 \log 0,5 \left(1 - \cos(4\tau)e^{-k_m^2} \right) \\ &\quad - 23 \log (\text{CPA}) \end{aligned}$$

θ = angle de site du trajet

τ = angle d'inclinaison de la polarisation linéaire par rapport à l'horizontale

τ = 45° pour la polarisation circulaire

k, k_m = paramètres effectifs de la distribution de l'angle de chute des gouttes de pluie en degrés.

$$k = 0$$

$$k_m = 0,25^\circ$$

XPD et CPA sont exprimés en dB

Des phénomènes de transpolarisation apparaissent également en l'absence d'affaiblissements significatifs. On les attribue au déphasage différentiel en présence de cristaux de glace. On peut rendre compte des effets de la transpolarisation due aux cristaux de glace sur la valeur globale de XPD par l'adjonction d'une constante Δ [11,12]. Nous adopterons provisoirement la valeur grossière $\Delta = -2\text{dB}$ citée par CHU [12].

V - COURBES D'AFFAIBLISSEMENT ET DE TRANSPOLARISATION

V.1. Choix des paramètres

Dans les calculs d'affaiblissement et de transpolarisation, interviennent des paramètres radioélectriques et des paramètres géographiques.

Les paramètres radioélectriques sont la fréquence et la polarisation. Les calculs sont effectués pour les fréquences centrales des bandes de fréquence allouées aux systèmes de télécommunication spatiale, c'est-à-dire :

19,45 GHz pour la bande 17,7 - 21,2 GHz

28,75 GHz pour la bande 27,5 - 30,0 GHz

Les polarisations peuvent être rectilignes ou circulaires.

Les affaiblissements par la pluie sont calculés pour des polarisations horizontales et verticales. Les valeurs ainsi obtenues encadrent les valeurs qui seraient obtenues pour des polarisations rectilignes de direction quelconque et pour des polarisations circulaires.

Les rapports de discrimination sont calculés pour des polarisations rectilignes verticales et des polarisations circulaires.

Les paramètres géographiques permettent de calculer l'angle de site θ du trajet radioélectrique ainsi que la longueur du trajet oblique L_s en dessous de la hauteur de précipitation et de déterminer l'intensité de précipitation $R_{0,01}$ pour 0,01 % du temps.

Compte-tenu de la position géostationnaire du satellite sur son orbite équatoriale, les paramètres géographiques nécessaires aux calculs sont :

la latitude ϕ de la station terrienne,
l'écart en longitude $\Delta\lambda$ entre le satellite et la station,
l'altitude h_0 de la station.

Les domaines de variation de ces paramètres sont liés à la zone géographique à couvrir.

Pour délimiter cette zone géographique, nous avons utilisé la couverture européenne type (figure 14) donnée dans l'appel d'offres. La zone retenue s'étend entre les latitudes 35° Nord et 70° Nord et les longitudes 30° Est et 20° Ouest. Son étendue en longitude est donc de 50°. On peut raisonnablement situer le méridien du satellite géostationnaire à l'intérieur de la zone de couverture à au moins 10° en longitude des méridiens extrêmes. Dans ces conditions, l'écart en longitude $\Delta\lambda$ entre le satellite et une station est compris entre 0 et 40°.

L'angle de site de la liaison avec le satellite est donné par les relations suivantes :

$$\cos\theta = \frac{D+R}{d} \sin u$$

$$d^2 = (D+R)^2 + (R+h_0)^2 - 2(D+R)(R+h_0) \cos u$$

$$\cos u = \cos \phi \cos \Delta\lambda$$

où D est l'altitude du satellite $D = 35\,780\text{ Km}$

R est le rayon terrestre $R = 6\,378\text{ km}$

d est la longueur de la liaison

Pour une station située au niveau de la mer ($h_0 = 0$) dans la zone définie plus haut, θ varie de 6,5° à 50°. Pour une station en altitude la valeur de θ est légèrement plus faible. Nous retiendrons donc les valeurs 5° et 50° comme limites de variation de l'angle de site θ .

V.2. Courbes d'affaiblissement

Les courbes d'affaiblissement par la pluie sont établies pour une station située à une latitude moyenne au niveau de la mer :

$$\phi = 50^\circ \text{ Nord}$$

$$h_0 = 0$$

$$\Delta\lambda = 0$$

ce qui correspond à un angle de site θ de $32,7^\circ$.

Les courbes sont réparties sur les figures 15 à 18 comme l'indique le tableau suivant :

Figure	Fréquence	Pol.	Zones
15	19,45 GHz	H et V	E,G,J
16	19,45 GHz	H et V	H,K,L
17	28,75 GHz	H et V	E,G,J
18	28,75 GHz	H et V	H,K,L

chaque courbe donne l'affaiblissement pour des pourcentages de temps compris entre 0,1 et 0,001.

Pour les stations situées à d'autres latitudes que $\phi = 50^\circ \text{ N}$ et pour d'autres écarts en longitude que $\Delta\lambda = 0$, on a calculé le rapport A/A_0 entre l'affaiblissement A (en dB) pour ϕ et $\Delta\lambda$ quelconques et l'affaiblissement A_0 (en dB) pour $\phi = 50^\circ$ et $\Delta\lambda = 0$. Les valeurs de A/A_0 sont représentées sur la figure 19 en fonction de ϕ variant de 35° à 70° avec $\Delta\lambda$ en paramètre. Ce rapport A/A_0 est égal au rapport des longueurs des trajets obliques L_s en dessous de la hauteur de précipitation (voir schéma de la figure 3), il est indépendant du pourcentage de temps.

Lorsque la station est à une altitude h_0 non nulle, la longueur L_s et l'angle de site θ diminuent. En première approximation on peut multiplier l'affaiblissement donné au niveau de la mer ($h_0 = 0$) par le facteur $\frac{h_R - h_0}{h_R}$ pour obtenir l'affaiblissement à une altitude non nulle. La

hauteur de précipitation $h_R(\phi)$ est donnée au paragraphe III.3. On a représenté sur la figure 20 une série de courbes $(h_r - h_0) / h_r = C^{te}$ en fonction de l'altitude h_0 et de la latitude ϕ de la station.

V.3 Courbes de transpolarisation

On a calculé le rapport de discrimination XPD donné au paragraphe IV pour la zone E ($R_{0,01} = 22$ mm/h), la fréquence 19,45 GHz en polarisation horizontale et pour 0,01 % du temps. Ces valeurs de XPD sont représentées sur la figure 21 en fonction de la latitude ϕ de la station terrestre avec l'écart en longitude $\Delta\lambda$ en paramètre.

Pour les autres zones et les autres polarisations on obtient la valeur de XPD en dB à 19,45 GHz pour 0,01 % du temps en apportant aux valeurs lues sur la figure 21 les corrections suivantes (en dB) :

Zone $R_{0,01}$ (mm/h)	E	G	H	J	K	L
	22	30	32	35	42	60
Pol H	0	- 3,4	- 4,1	- 5,1	- 7,1	- 11,1
Pol V	+ 1,9	- 1,4	- 2,1	- 3,1	- 5,0	- 8,8
Pol C	- 14,1	- 17,5	- 18,2	- 19,1	- 21,1	- 25,0

Pour la fréquence 28,75 GHz la valeur de XPD pour 0,01 % du temps est obtenue en apportant aux valeurs lues sur la figure 21 les corrections suivantes (en dB) :

Zone $R_{0,01}$ (mm/h)	E 22	G 30	H 32	J 35	K 42	L 60
Po1 H	- 1,4	- 4,6	- 5,2	- 6,2	- 8,0	- 11,7
Po1 V	- 0,5	- 2,7	- 3,3	- 4,2	- 6,1	- 9,6
Po1 C	- 15,6	- 18,7	- 19,4	- 20,3	- 22,1	- 25,8

Ces valeurs de XPD ont été calculées pour une station située au niveau de la mer ($h_0 = 0$). Lorsque la station est à une altitude h_0 non nulle la longueur L_s du trajet au dessous de la hauteur de précipitation h_R diminue ainsi que l'angle de site θ .

L'affaiblissement copolaire CPA est en première approximation multiplié par le coefficient $(h_R - h_0) / h_R$ (pragraphe V-2). Le rapport de discrimination XPD est alors augmenté de la quantité

$$- 23 \log \left(\frac{h_R - h_0}{h_R} \right)$$

La diminution de l'angle de site θ contribue à diminuer la valeur du rapport XDP (terme $- 40 \log (\cos\theta)$).

Une variation de la valeur du rapport XPD donnée par la relation suivante :

$$\Delta_{XPD} = - 20 \log \left(\frac{h_R - h_0}{h_R} \right)$$

permet de corriger l'effet de l'altitude h_0 non nulle avec une bonne précision.

On a représenté sur la figure 22 une série de courbes

$$- 20 \log \left(\frac{h_R - h_0}{h_R} \right) = \text{Cte}$$

en fonction de l'altitude h_0 et de la latitude ϕ de la station.

VI - RECEPTION EN DIVERSITE D'EMPLACEMENT

On peut améliorer la disponibilité des liaisons Terre-Satellite affectées par les précipitations en utilisant deux stations de réception fonctionnant en diversité d'emplacement.

La diversité d'emplacement peut en effet être efficace car les précipitations se présentent sous forme de cellules de dimension finie, horizontalement et verticalement. De plus, lorsque l'intensité de pluie, et donc l'atténuation, augmentent, la taille des cellules tend à diminuer.

Les résultats de différentes études sur la diversité d'emplacement ont été condensés par le CCIR [3], sous la forme de courbes présentées sur la figure 23.

Ces courbes montrent que la probabilité pour qu'un affaiblissement soit dépassé simultanément à deux emplacements dépend de l'espacement entre ceux-ci. Elles montrent également que l'amélioration de la diversité avec l'espacement des emplacements est plus rapide pendant les pourcentages du temps les plus faibles.

Ces courbes composites ont été établies sur la base de données restreintes et doivent être utilisées avec prudence. En effet les avantages de la diversité peuvent être considérablement réduits si les deux emplacements sont affectés simultanément par la pluie, c'est le cas lorsque la ligne qui joint les deux emplacements est parallèle aux fronts pluviaux dominants.

L'amélioration de la diversité dépend également de la fréquence, de l'angle de site et de l'angle entre la droite joignant les deux stations et la direction du satellite.

L'amélioration apportée par la diversité augmente avec l'angle d'élévation [3, 13]. Ceci peut s'expliquer par le fait que la longueur du trajet soumise à la pluie diminue lorsque l'angle d'élévation augmente. Pour

obtenir le même affaiblissement, il faut donc une intensité de pluie plus forte pour le trajet à élévation élevée. Or, l'étendue des cellules de pluie diminue lorsque l'intensité augmente. On conçoit donc que la diversité soit plus efficace pour les angles d'élévation élevés.

Diverses études ont montré qu'il est préférable d'orienter la ligne joignant les deux stations perpendiculairement à la direction du satellite.

En tout état de cause, une bonne étude des caractéristiques de la région, en particulier du régime des vents, peut aider à choisir l'orientation des stations de réception car, dans certaines conditions, l'allongement des cellules peut jouer.

A partir de la distribution de l'affaiblissement mesuré à une station de réception et de la distribution du plus petit affaiblissement mesuré simultanément aux deux stations on peut calculer un gain de diversité. Le gain de diversité est défini comme la différence (mesurée en dB) des affaiblissements des deux distributions pour un même pourcentage de temps. Le gain en diversité est une notion statistique et non une mesure instantanée. Il représente la réduction que l'on peut apporter à la marge de la liaison pour conserver la même disponibilité que sans diversité.

Pour une fréquence quelconque f , on peut relier le gain de diversité G à l'affaiblissement A et la distance D par les relations suivantes [13] :

$$\begin{aligned} G &= a (1 - \exp (-b D)) \\ a &= A - 3,6 \rho (1 - \exp (-0,24 A/\rho)) \\ b &= 0,46 (1 - \exp (-0,26 A/\rho)) \end{aligned}$$

où
$$\rho = \frac{A_f}{A_{15,5}} \text{ pour } 30 \text{ mm/h environ}$$

A partir de ces relations on a tracé, pour 20 et 30 GHz, les courbes donnant le gain de diversité en fonction de la distance pour divers affaiblissements. (Figures 24 a et b).

Il faut rappeler que ces courbes ne sont valables que pour une élévation de 35° environ.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CCIR, Rapport 563-1 (MOD F), Données radiométéorologiques.
- [2] P.A. WATSON, Development of a climatic map of rainfall attenuation for Europe, Interim report for ESA, Report 300, March 1981.
- [3] CCIR, Rapport 564-1 (MOD F), Données sur la propagation nécessaires pour les systèmes de télécommunication spatiale.
- [4] Advanced satellite communications systems using the 20-30 GHz bands ESA, SP 138, 1977.
- [5] MISME, P., and P. WALDTEUFEL, Calcul des affaiblissements par la pluie sur un trajet Terre-Satellite, Annales des Télécommunications, Jan-Fév. 81, 36, n° 1-2, pp. 65-72.
- [6] MISME, P. and P. WALDTEUFEL, Améliorations du modèle pour le calcul des atténuations dues à la pluie sur un trajet Terre - Espace et étude de sensibilité aux paramètres, Annales de Télécommunications, Juillet-Août 1981, 36, n° 7-8, pp. 421-438.
- [7] BOITHIAS, L. et J. BATTESTI, Prediction of attenuation due to rain. Communication au CCIR, groupe IWP 5/2, mai 1982.
- [8] DRUFUCA, G., Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz, J. Res. Atmosph., 1974.
- [9] COX, D.C. and H.W. ARNOLD, Results from the 19 and 28 GHz COMSTAR Satellite Propagation experiments at Crawford Hill, Proc. IEEE, Vol. 70, n°5, May 1982.

- [10] BATTESTI, J. Au sujet de la dépendance en fréquence de l'affaiblissement dû à la pluie, Ann. Télécom., Tome 36, n° 3-4, 1981.
- [11] CCIR, Rapport 722 (MOD F), Transpolarisation due à l'atmosphère.
- [12] CHU, T.S., Analysis and prediction of cross-polarization on Earth-Space links. Proc. of URSI Commission F International Symposium on "Effects of the lower atmosphere on radio propagation at frequencies above 1 GHz", Lenoxville, Canada, 1980.
- [13] FIMBEL, J., et M. JUY, Influence de la diversité d'emplacement dans les liaisons Terre-Satellite, CNET, NT/EST/APH/36, Juillet 1976.

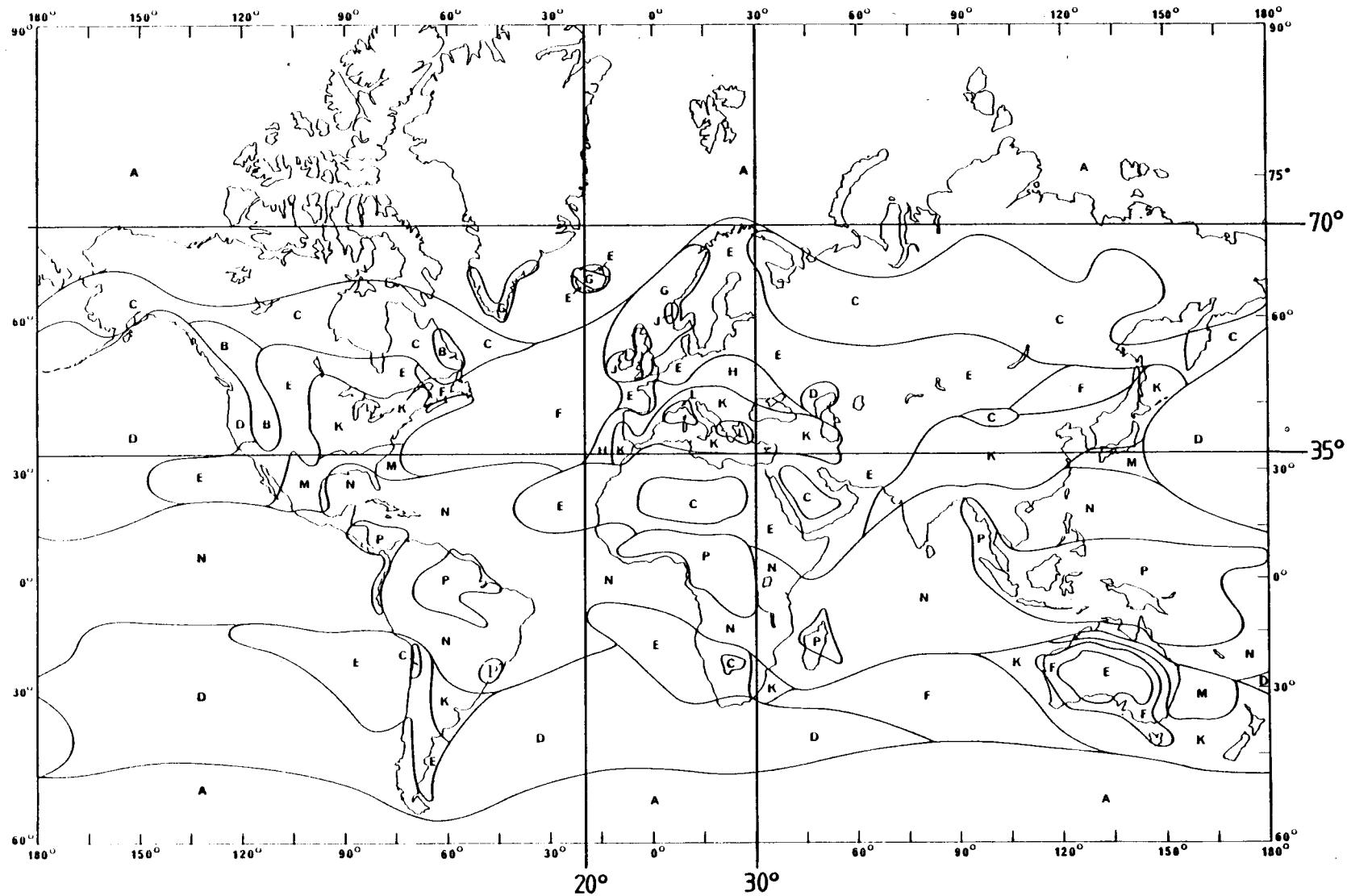


Figure 1 : Zones hydrométéorologiques établies par le CCIR

- La région européenne est comprise entre les latitudes 35°N et 70°N et entre les longitudes 20° Ouest et 30° Est.
- Les intensités de précipitation sont représentées sur la Figure 2

% du temps	E	G	H	J	K	L
1	1				2	
0,3	3	7	4	13	6	7
0,1	6	12	10	20	12	15
0,05	9	16	14	24	17	23
0,03	12	20	18	28	23	33
0,01	22	30	32	35	42	60
0,005	32	39	45	41	67	85
0,003	41	45	55	45	70	105
0,001	70	65	83	55	100	150

Figure 2. Zones hydrométéorologiques pour l'Europe. Intensités de précipitation dépassées (mm/h).

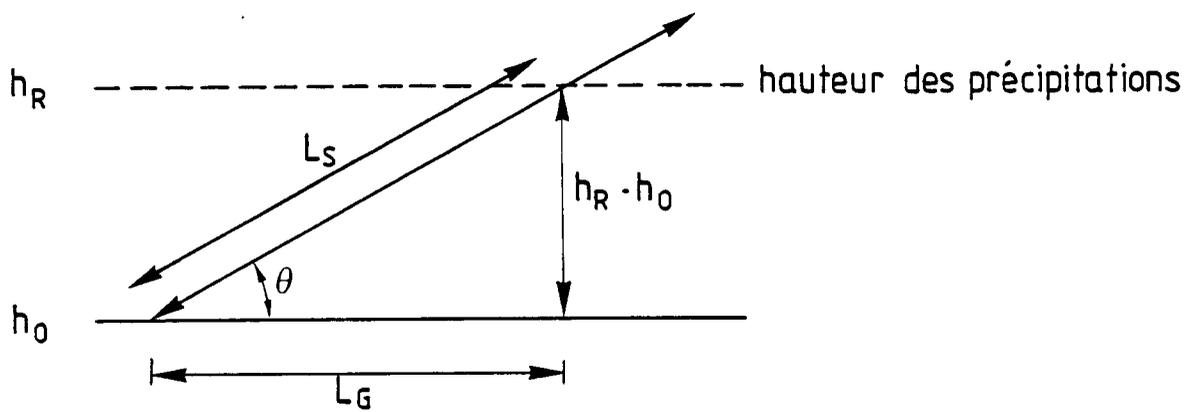


Figure 3: Représentation schématique d'un trajet Terre - Satellite donnant les paramètres relatifs au processus de prévision de l'affaiblissement

Fréquence (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
2	0,000154	0,000138	0,963	0,923
4	0,000650	0,000591	1,12	1,07
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
8	0,00454	0,00395	1,327	1,310
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0347	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,979	0,963
40	0,350	0,310	0,931	0,929
45	0,442	0,393	0,903	0,897
50	0,536	0,479	0,873	0,868
60	0,707	0,642	0,826	0,824
70	0,851	0,784	0,793	0,793
80	0,975	0,906	0,769	0,769
90	1,06	0,999	0,753	0,754
100	1,12	1,06	0,743	0,744
120	1,18	1,13	0,731	0,732
150	1,31	1,27	0,710	0,711
200	1,45	1,42	0,689	0,690
300	1,36	1,35	0,688	0,689
400	1,32	1,31	0,683	0,684

Figure 4. Coefficients de régression pour l'évaluation des paramètres d'affaiblissement.

STATIONS EN EUROPE

N°	NOM	F(GHz)	Pol.
3	GOMETZ	11.8	C
19	NEDERHORST	11.6	H
20	BERGEN	11.6	H
21	TRONDHEIM	11.6	H
22	SLOUGH	11.8	C
23	SLOUGH	11.6	C
24	MARTLESHAM	11.8	C
25	MARTLESHAM	11.8	C
31	LEEHEIM	11.6	V R
32	FUCINO	11.6	C
33	LARIO	11.6	C
34	SPINO	11.6	C
35	LEEHEIM	11.6	H
40	SLOUGH	12.0	C R-S
69	ALBERTSLUND	11.8	C
71	COPENHAGEN	11.8	C
72	COPENHAGEN	11.8	C
73	COPENHAGEN	11.8	C

C = Polarisation circulaire
 H = Polarisation rectiligne horizontale
 V = Polarisation rectiligne verticale
 R = Radiomètre
 R-S = Radiomètre solaire

Figure 5. Liste des stations européennes qui ont fourni des données de propagation dans la bande des 12 GHz.

N°	NOM	F(GHz)	Pol.
13	KASHIMA	19.5	C
14	YOKOSUKA	19.5	C
15	YOKOHAMA	19.5	C
16	WAKKANAI	19.5	C
17	SENDAI	19.5	C
38	AUSTIN	19.0	H
39	YAMAGAWA	19.5	C
47	MARTLESHAM	20.0	C R
49	PARIS	20.0	C R-S
63	HOLMDEL	19.0	V
64	BLACKSBURG	19.0	V
65	BLACKSBURG	19.0	V
74	WALTHAM	19.0	H
78	WALTHAM	19.0	H
79	CLARKSBURG	19.0	H
80	CLARKSBURG	19.0	H
81	CLARKSBURG	19.0	H
46	SLOUGH	37.0	C R-S
48	MARTLESHAM	30.0	C R
66	HOLMDEL	28.6	V
67	BLACKSBURG	28.6	V
68	BLACKSBURG	28.6	V

C = Polarisation circulaire
 H = Polarisation rectiligne horizontale
 V = Polarisation rectiligne verticale
 R = Radiomètre
 R-S = Radiomètre solaire

Figure 6. Liste des stations qui ont fourni des données de propagation à 20 et 30 GHz.

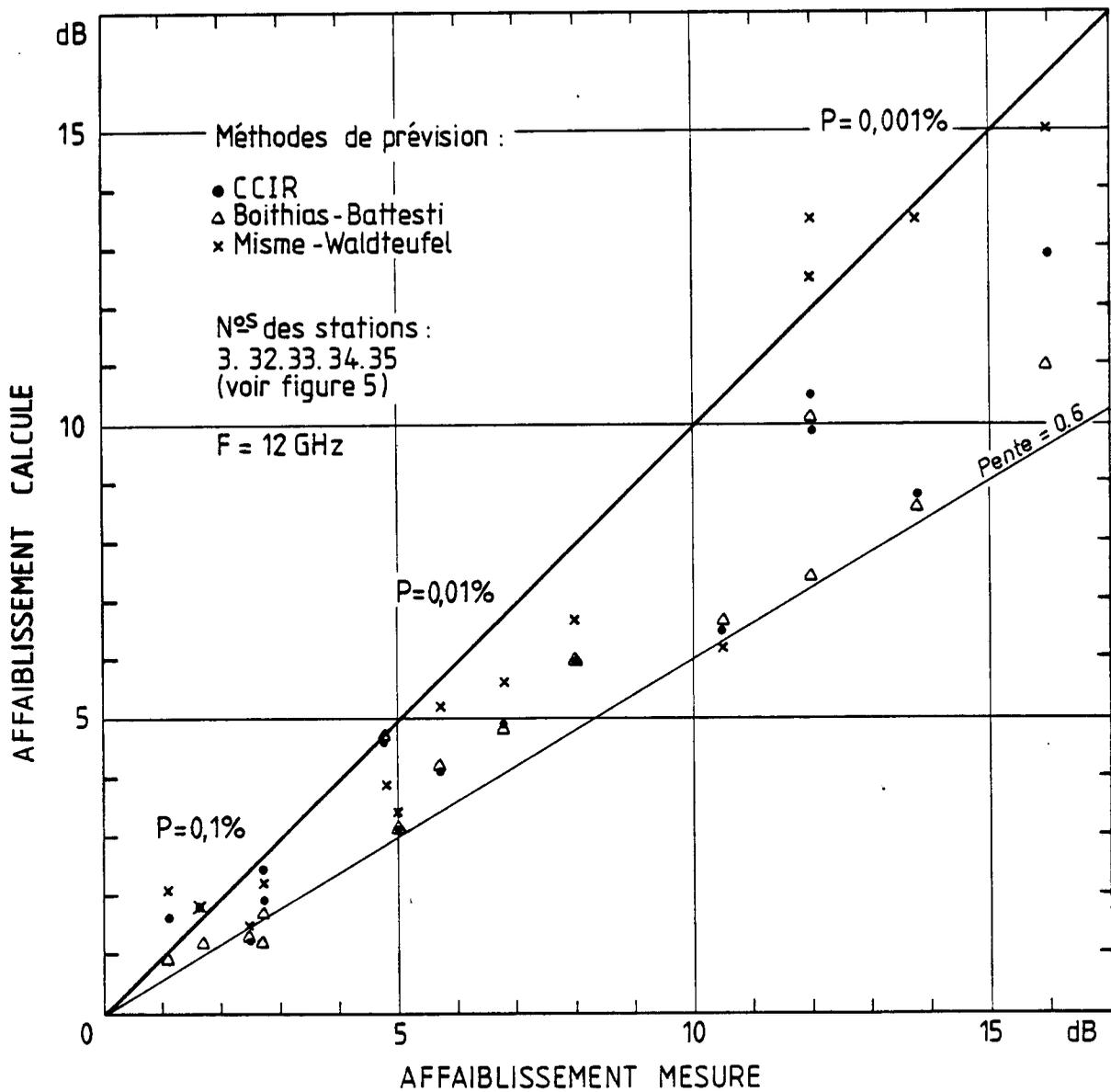


Figure 7 : Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 12 GHz en Europe. Les intensités de précipitation utilisées dans les méthodes de prévision de l'affaiblissement par la pluie ont été mesurées simultanément aux affaiblissements.

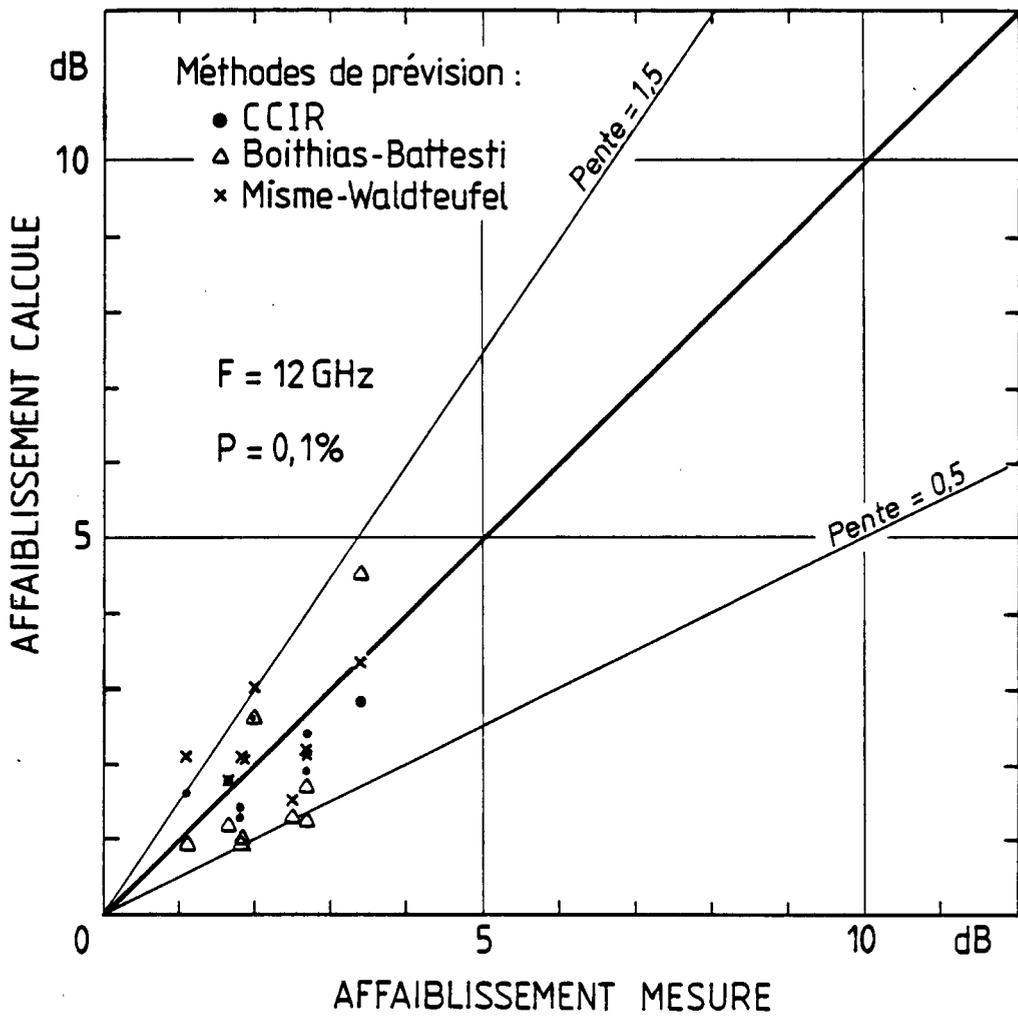


Figure 8 : Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 12 GHz en Europe pour 0,1% du temps. liste des stations sur la Figure 5.

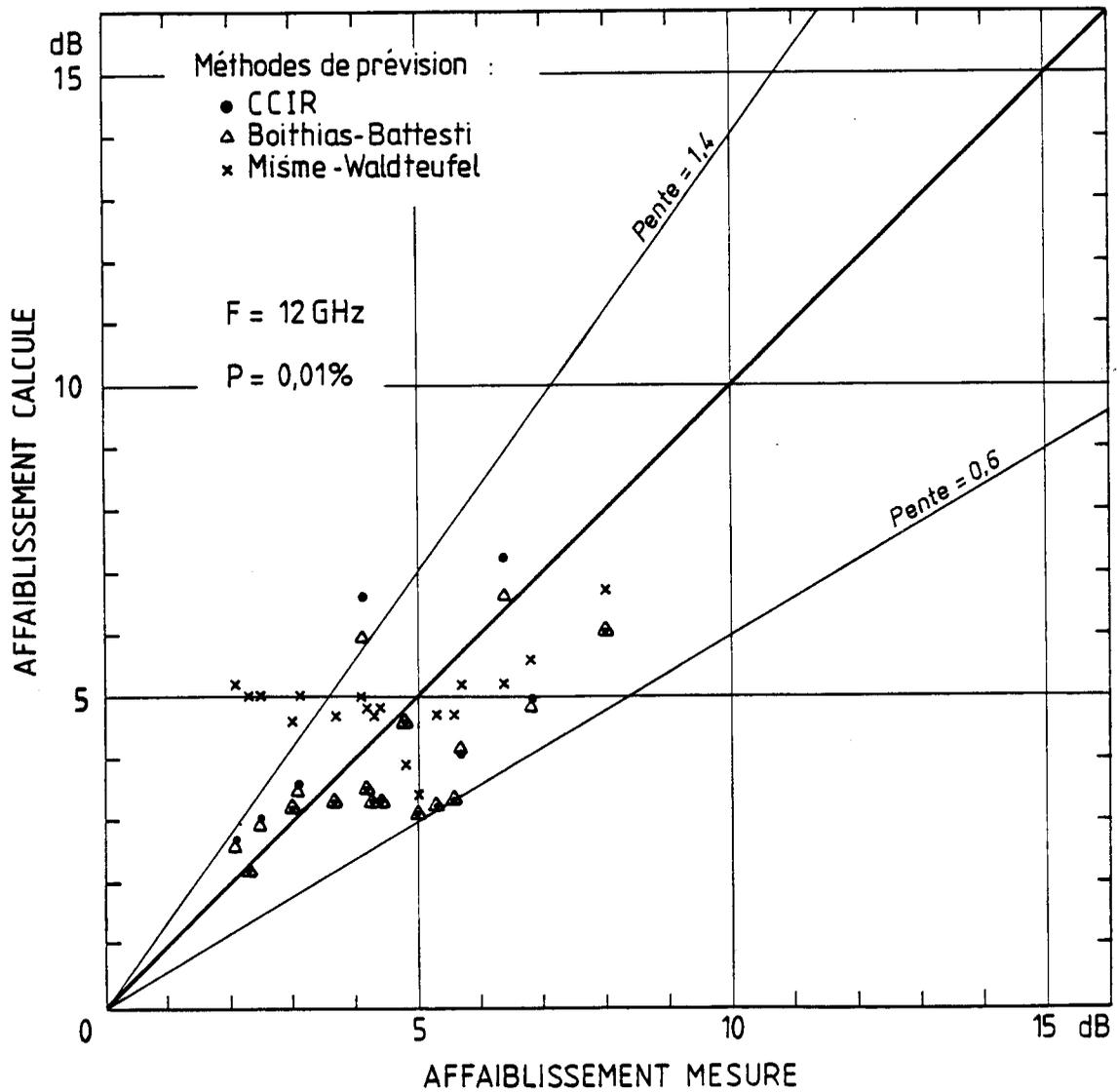


Figure 9 : Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 12GHz en Europe pour 0,01% du temps. liste des stations sur la Figure 5.

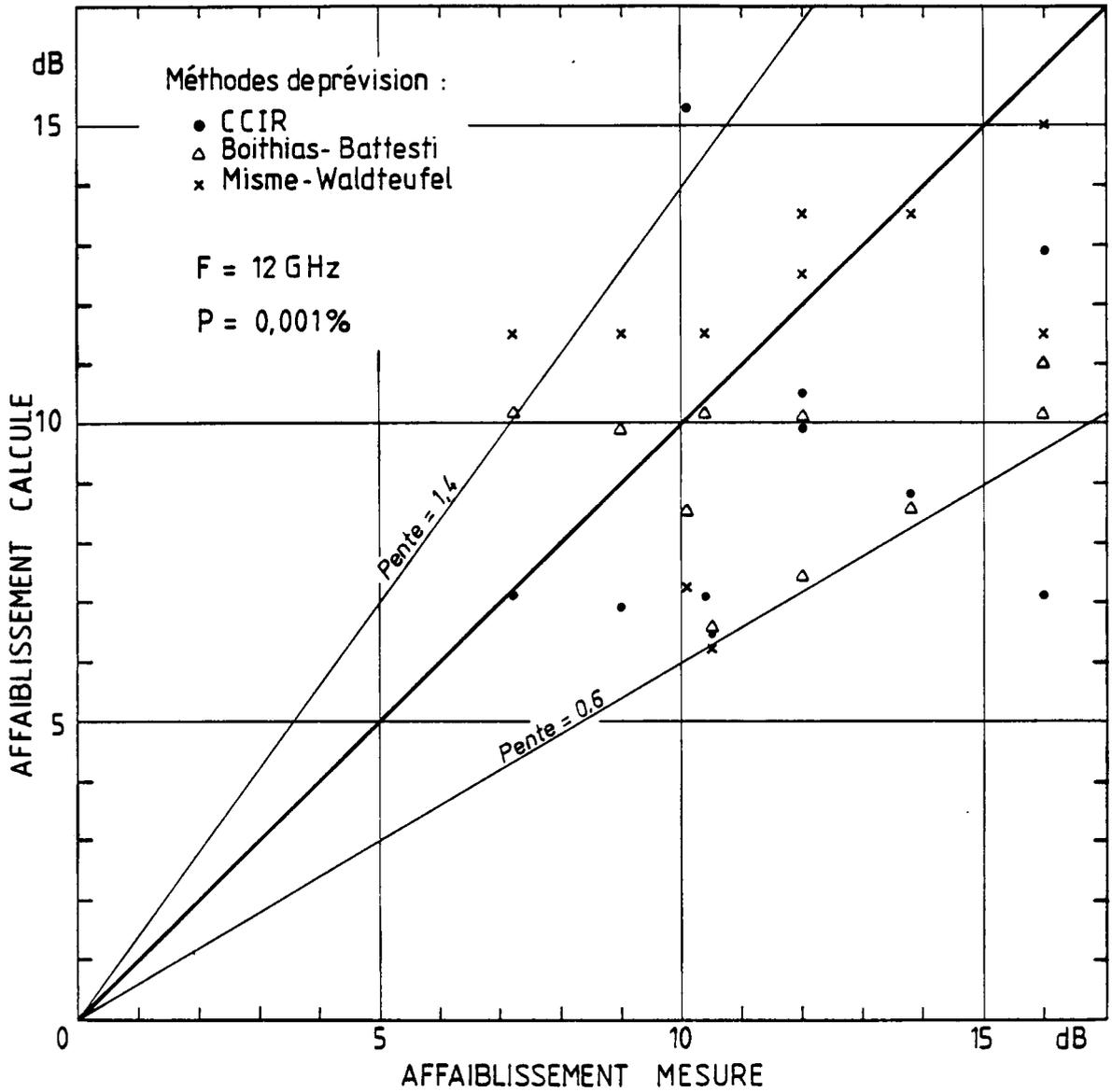


Figure 10: Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 12 GHz en Europe pour 0,001% du temps. liste des stations sur la Figure 5.

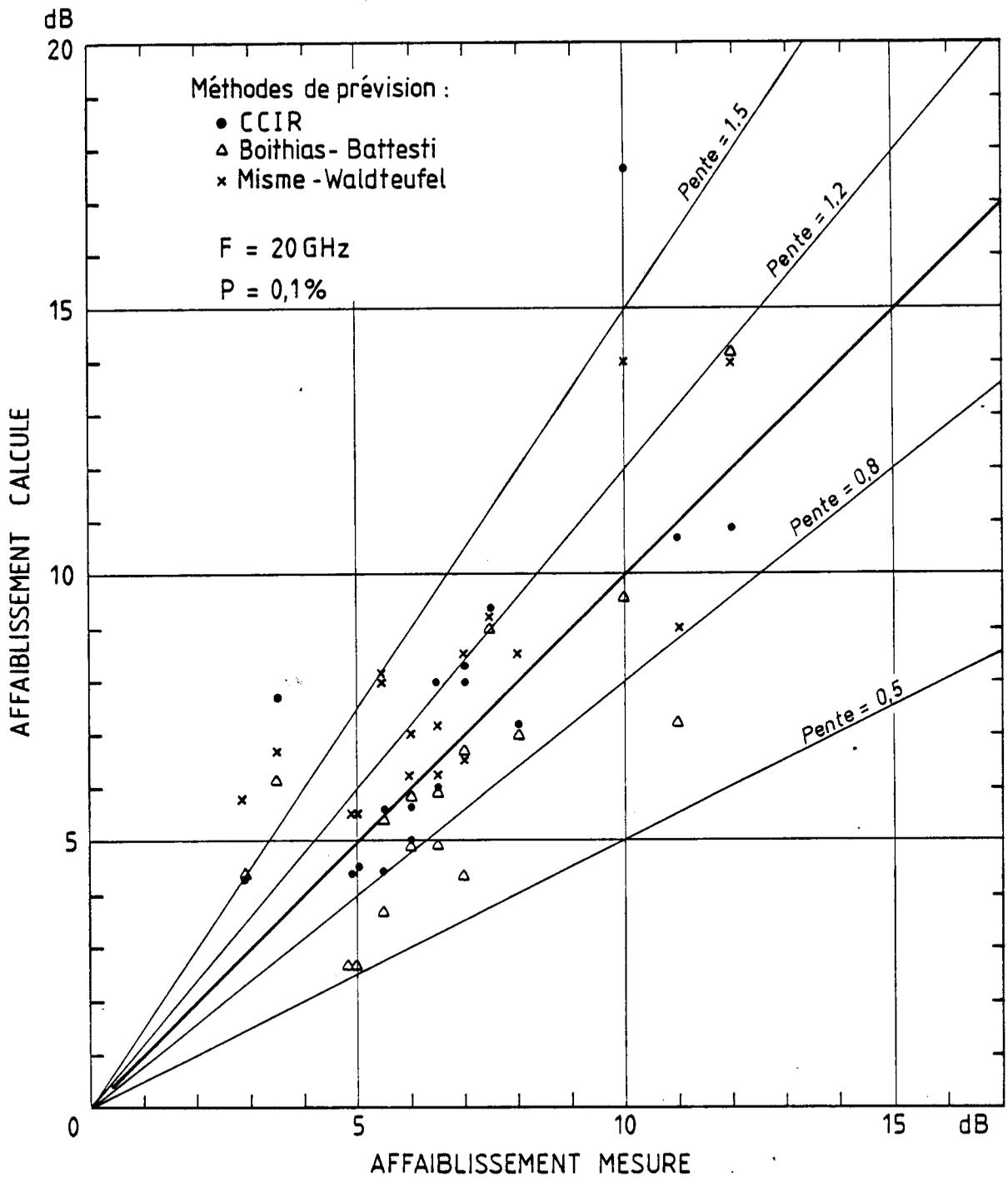


Figure 11: Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 20GHz pour 0,1% du temps pour les stations de la Figure 10.

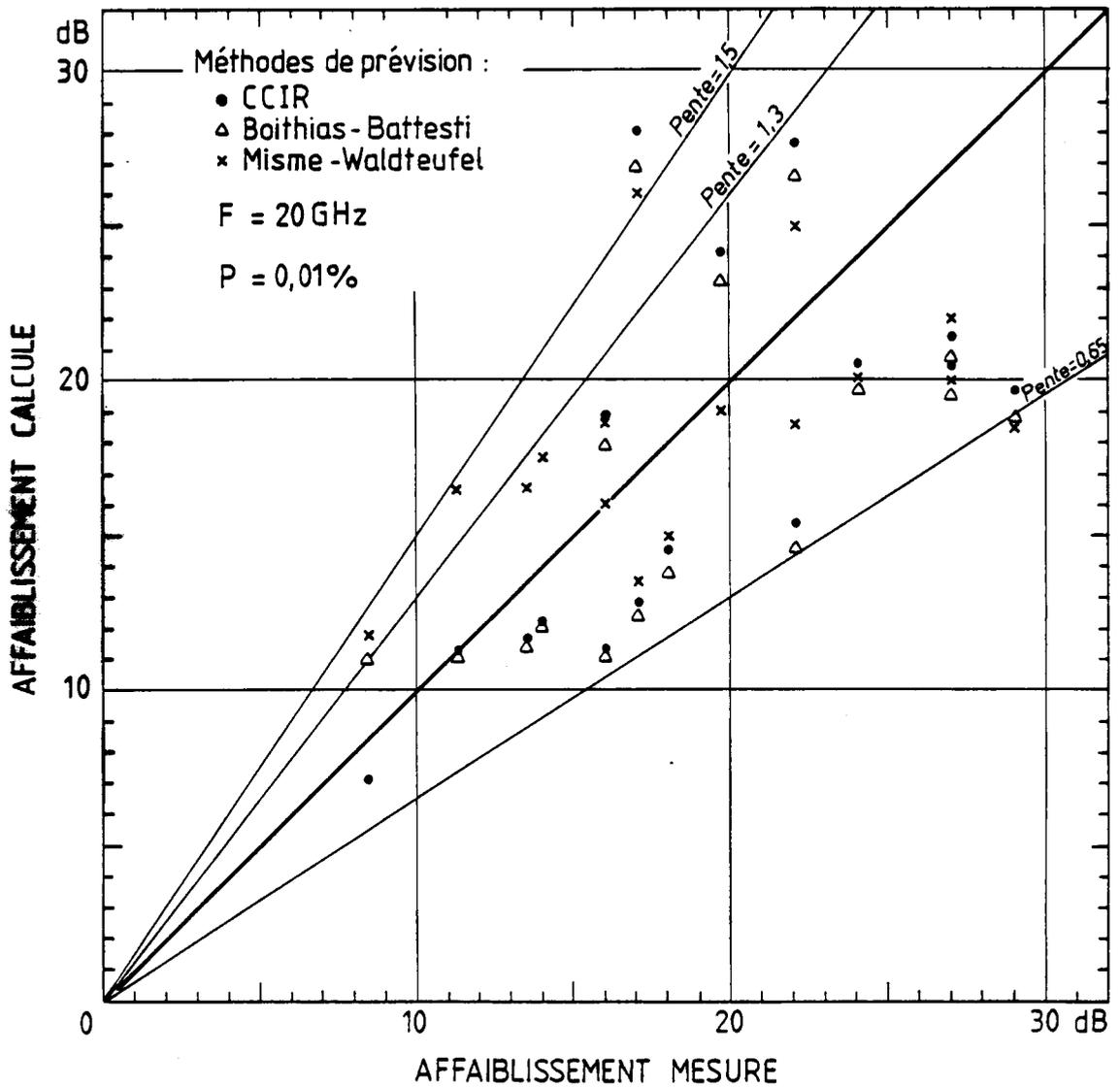


Figure 12 : Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 20 GHz pour 0,01% du temps, pour les stations de la Figure 10.

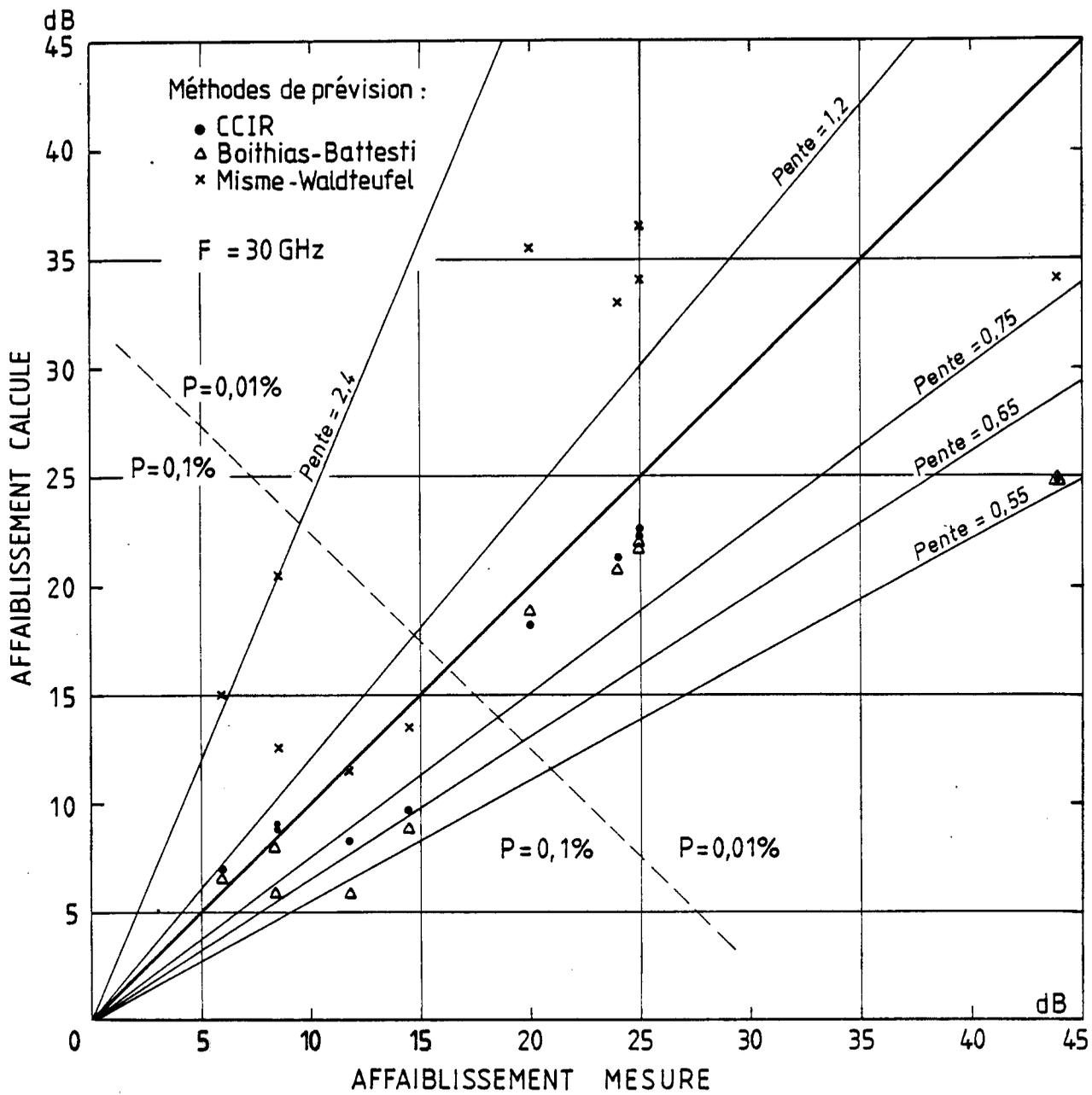
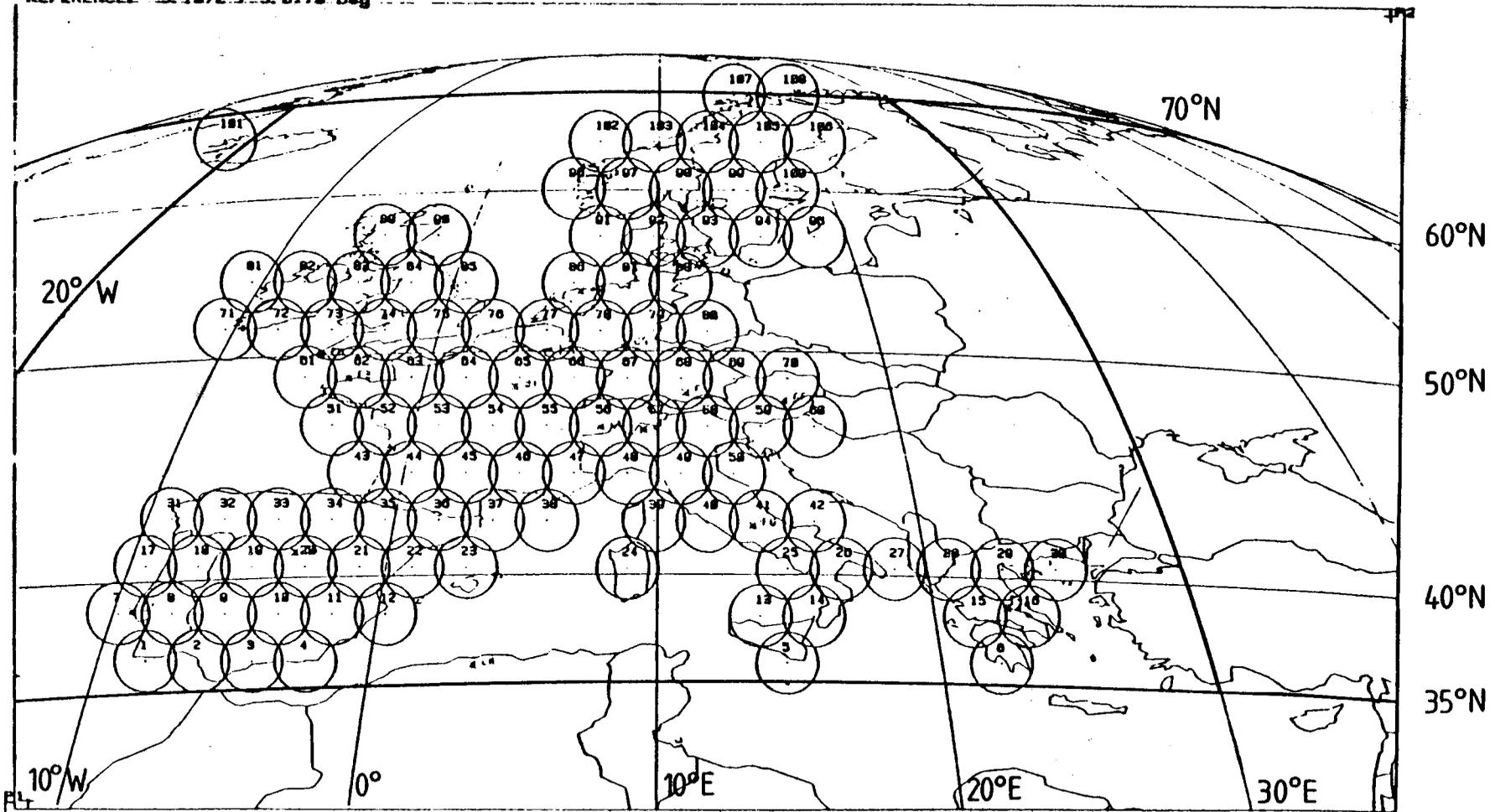


Figure 13: Corrélation entre les affaiblissements mesurés et les affaiblissements calculés à 30GHz pour 0,1% et 0,01% du temps pour les stations de la Figure 10.

P1: -3.0000 / 5.1000 Deg.
P2: 3.5000 / 8.0000 Deg.

OUVERTURE A 3 dB DES FAISCEAUX : 0.2550 Deg
DISTANCE ENTRE FAISCEAUX CONTIGUS : 0.2550 Deg

REFERENCE: S. 1072 / -3.0770 Deg



CASSETTE WIDEBAND MISSION TRK0 FILE 2 *****14 MAI 1981*****

Figure 14: Couverture européenne type

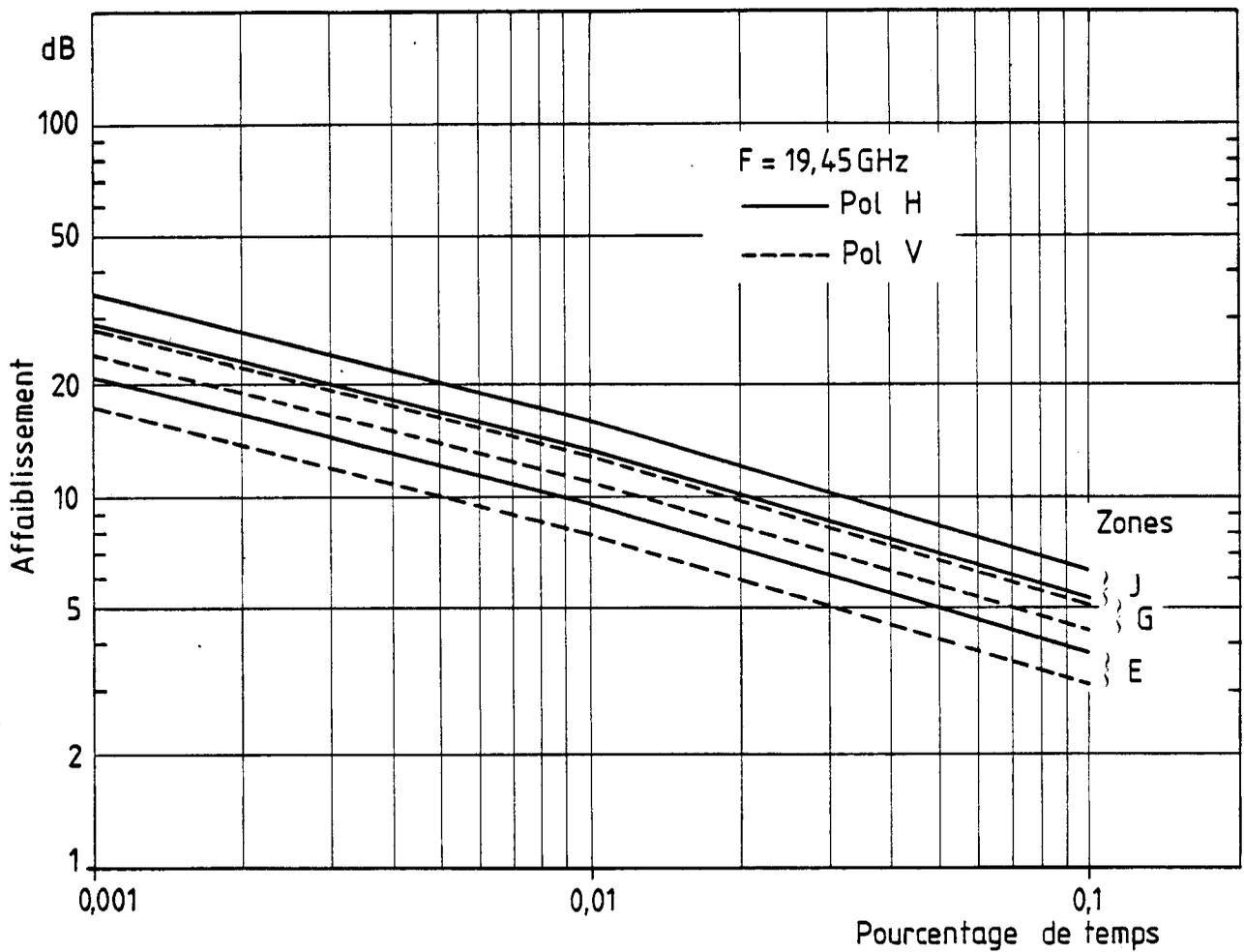


Figure 15: Affaiblissement par la pluie sur un trajet Terre - Satellite à 19,45 GHz en polarisation horizontale et verticale, pour les zones E,G,J et pour une station européenne ($\Phi=50^\circ\text{N}$, $\Delta\lambda=0$, $h_0=0$)

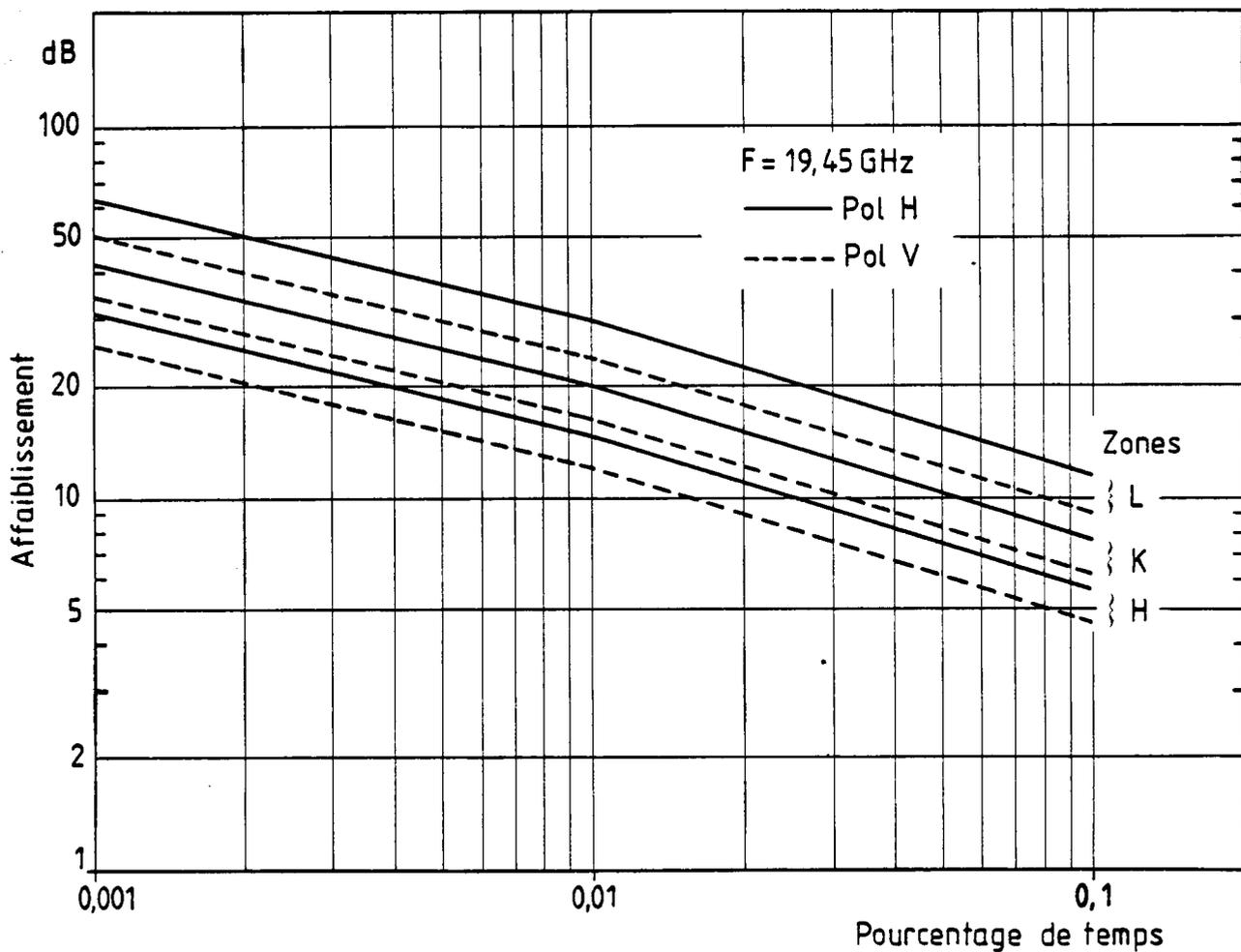


Figure 16: Affaiblissement par la pluie sur un trajet Terre-Satellite à 19,45 GHz en polarisation horizontale et verticale, pour les zones H,K,L et pour une station européenne ($\Phi = 50^\circ N, \Delta\lambda = 0, h_0 = 0$)

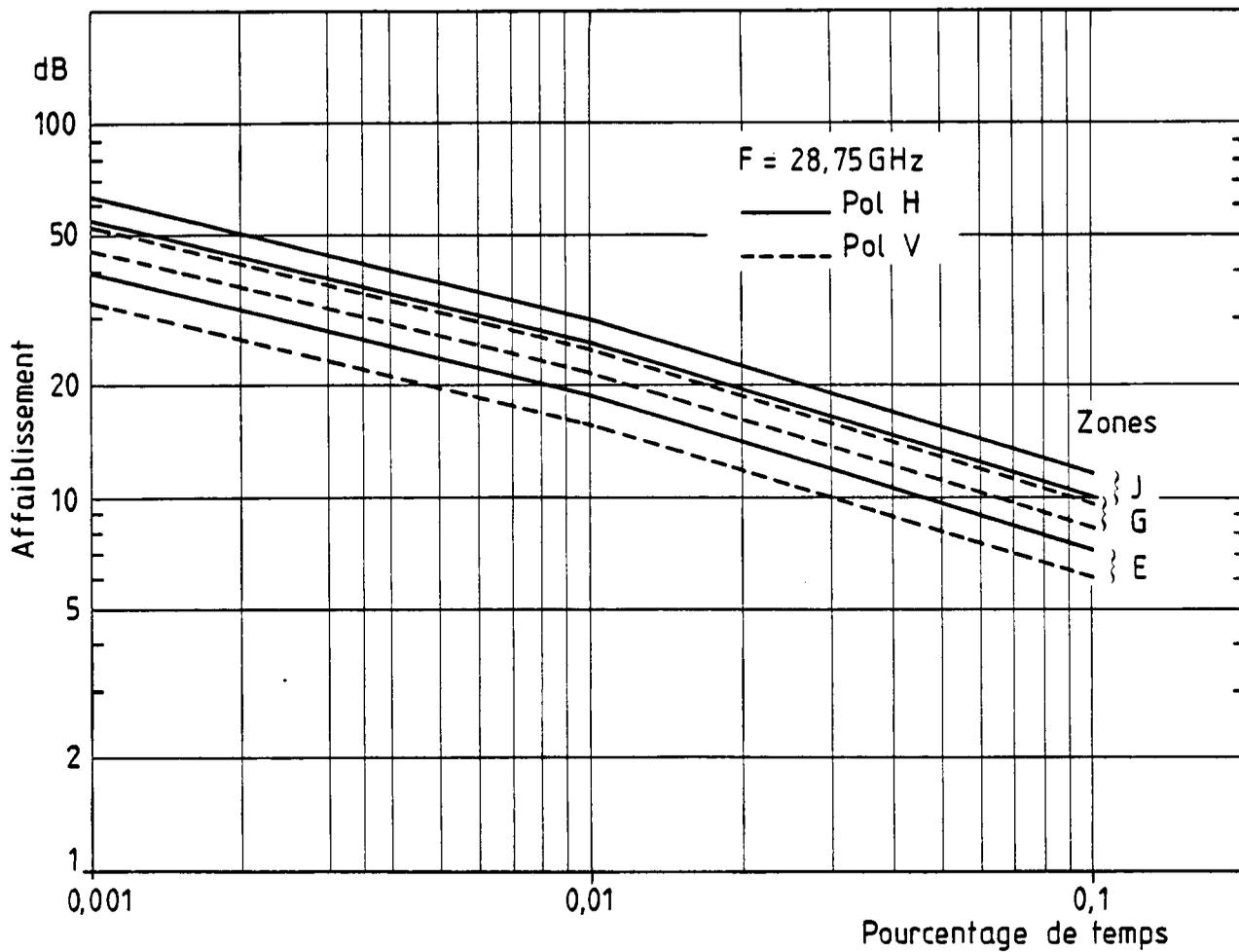


Figure 17: Affaiblissement par la pluie sur un trajet Terre - Satellite à 28,75 GHz en polarisation horizontale et verticale, pour les zones E, G, J et pour une station européenne ($\Phi = 50^\circ \text{N}$, $\Delta\lambda = 0$, $h_0 = 0$)

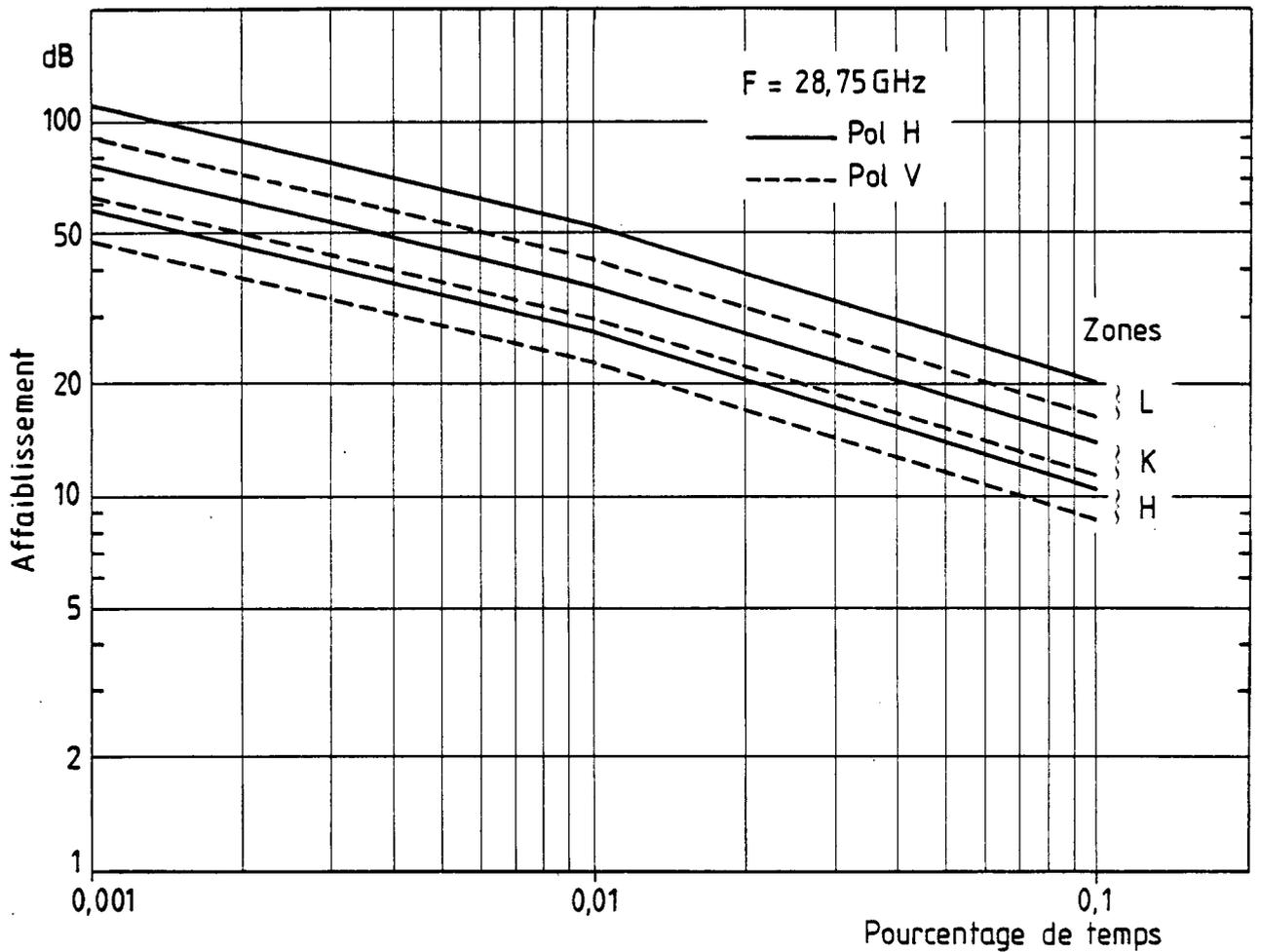


Figure 18: Affaiblissement par la pluie sur un trajet Terre - Satellite à 28,75 GHz en polarisation horizontale et verticale, pour les zones H,K,L et pour une station européenne ($\Phi = 50^\circ \text{N}$, $\Delta\lambda = 0$, $h_0 = 0$)

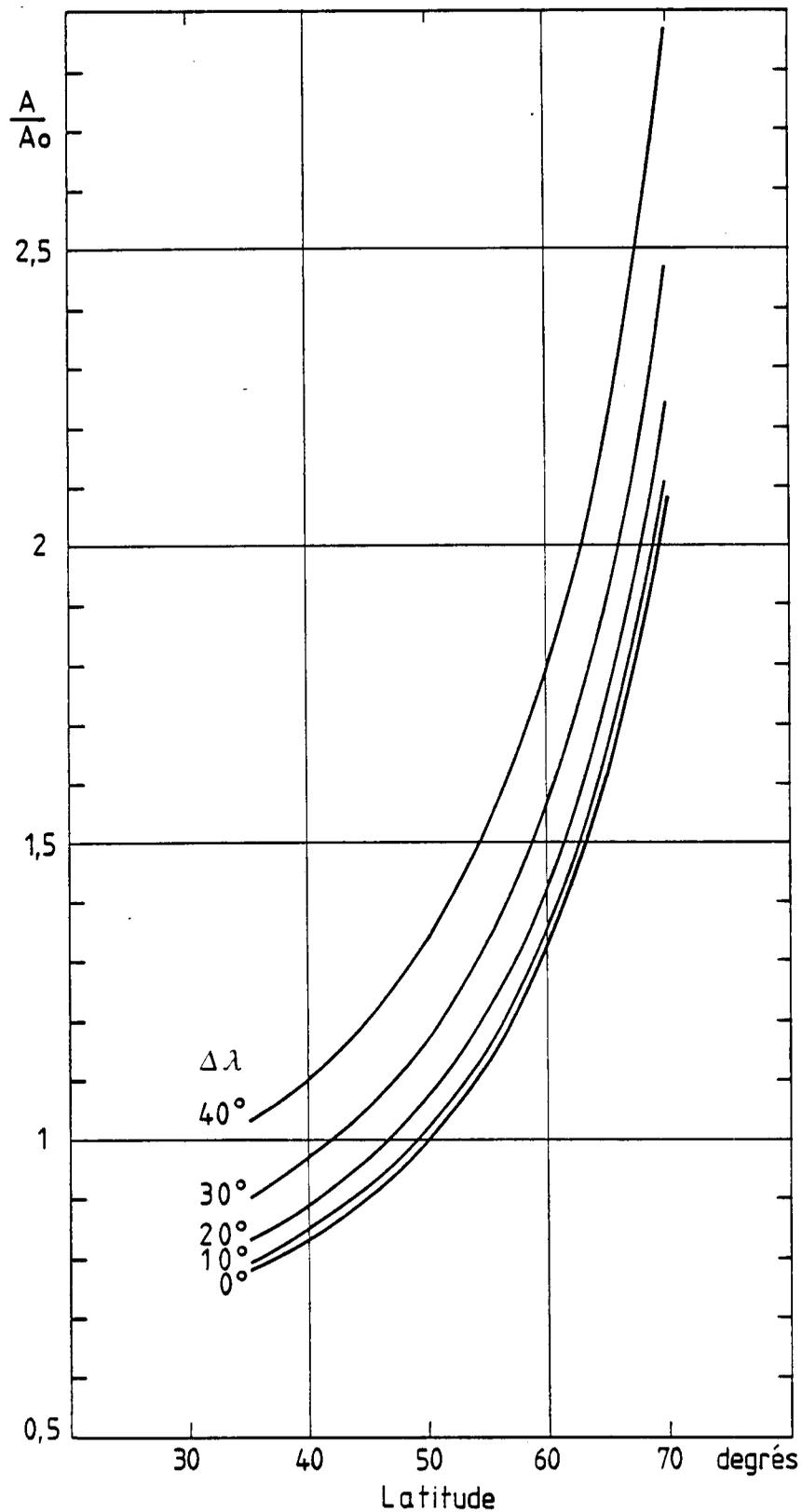


Figure 19 : Rapport d'affaiblissement A/A_0 en fonction de la latitude Φ avec l'écart en longitude $\Delta\lambda$ en paramètre. A_0 est l'affaiblissement donné sur les Figures 15 à 18 pour $\Phi = 50^\circ\text{N}$, $\Delta\lambda = 0$, $h_0 = 0$.

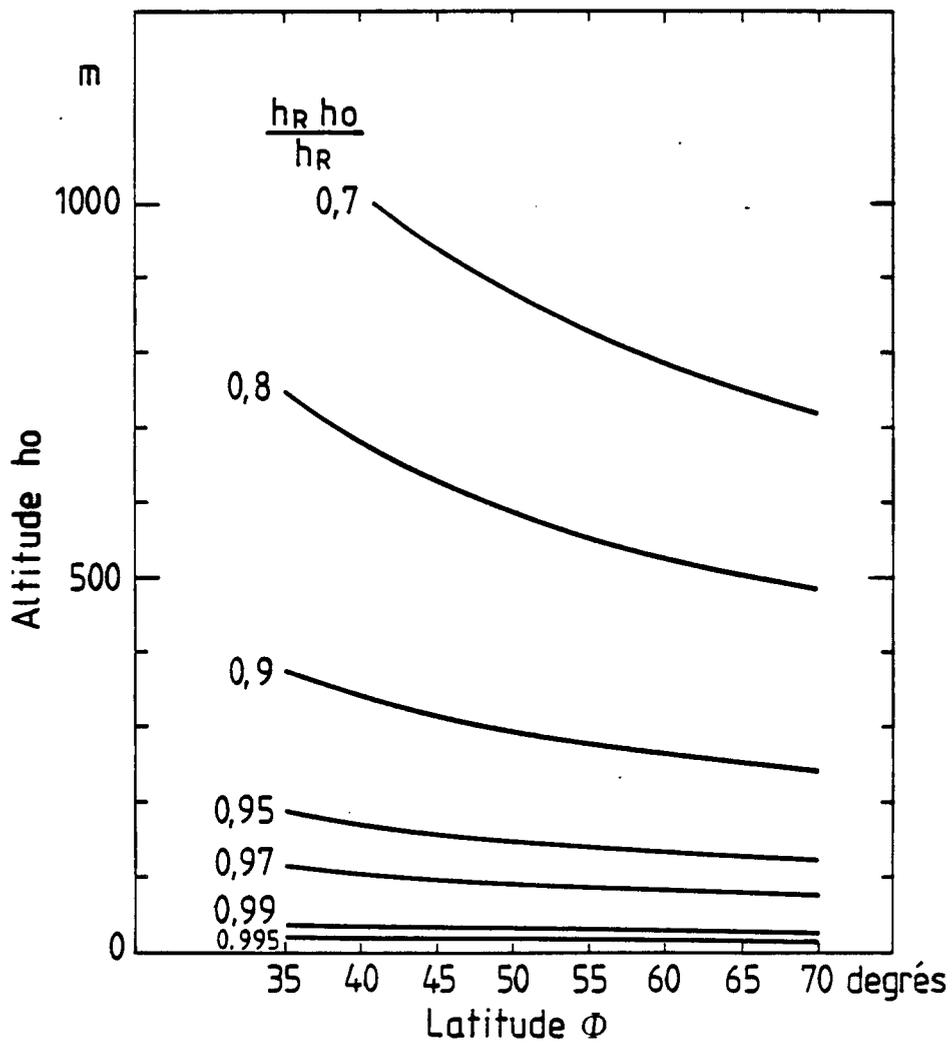


Figure 20: Coefficient multiplicateur de l'affaiblissement en dB pour une station en altitude ($h_o \neq 0$).

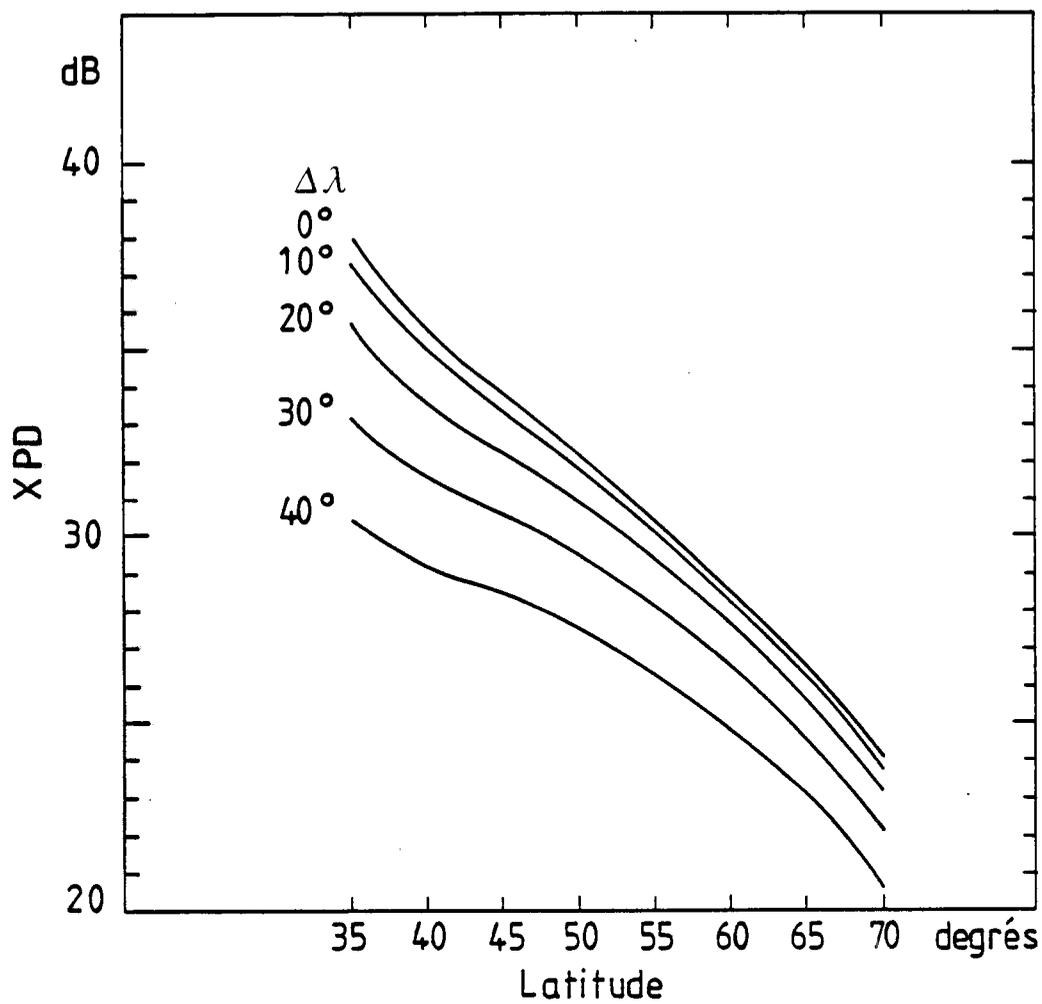


Figure 21: Rapport de discrimination XPD en fonction de la latitude pour
 $F = 19,45 \text{ GHz}$, polarisation horizontale
 Zone E $R_{0,01} = 22 \text{ mm/h}$
 $p = 0,01\%$

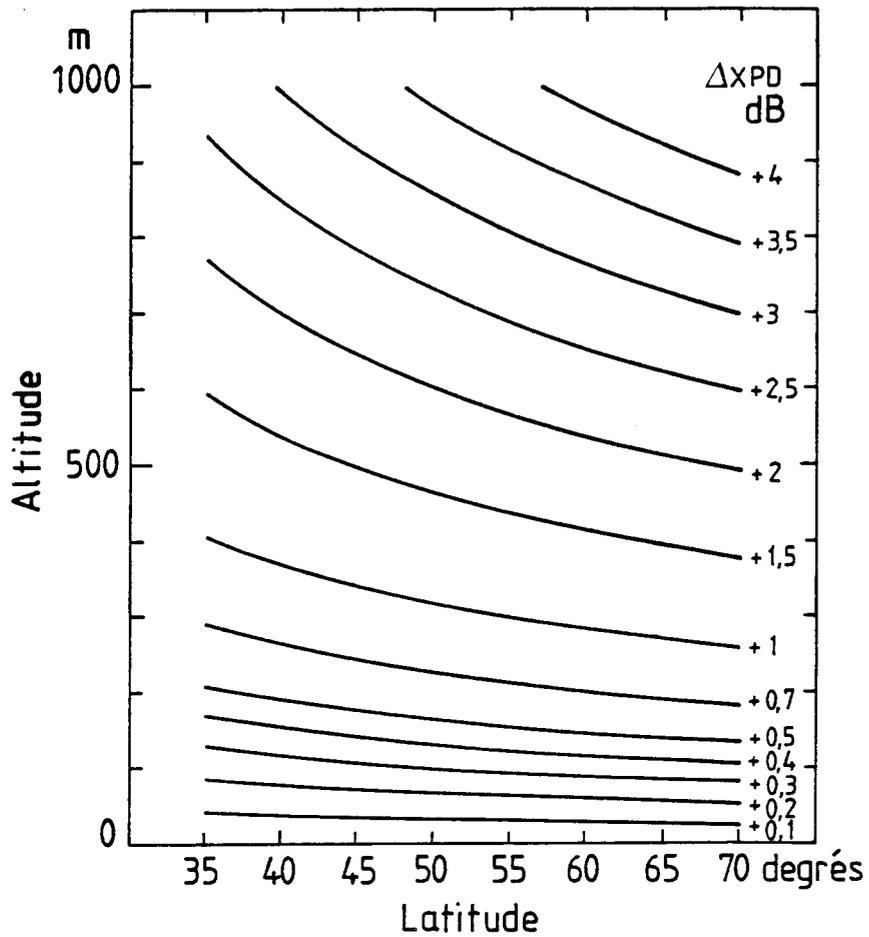


Figure 22 : Correction ΔXPD (en dB) à ajouter au rapport de discrimination XPD pour une station en altitude ($h_0 \neq 0$)

$$\Delta XPD = 20 \log \left(\frac{h_R - h_0}{h_R} \right)$$

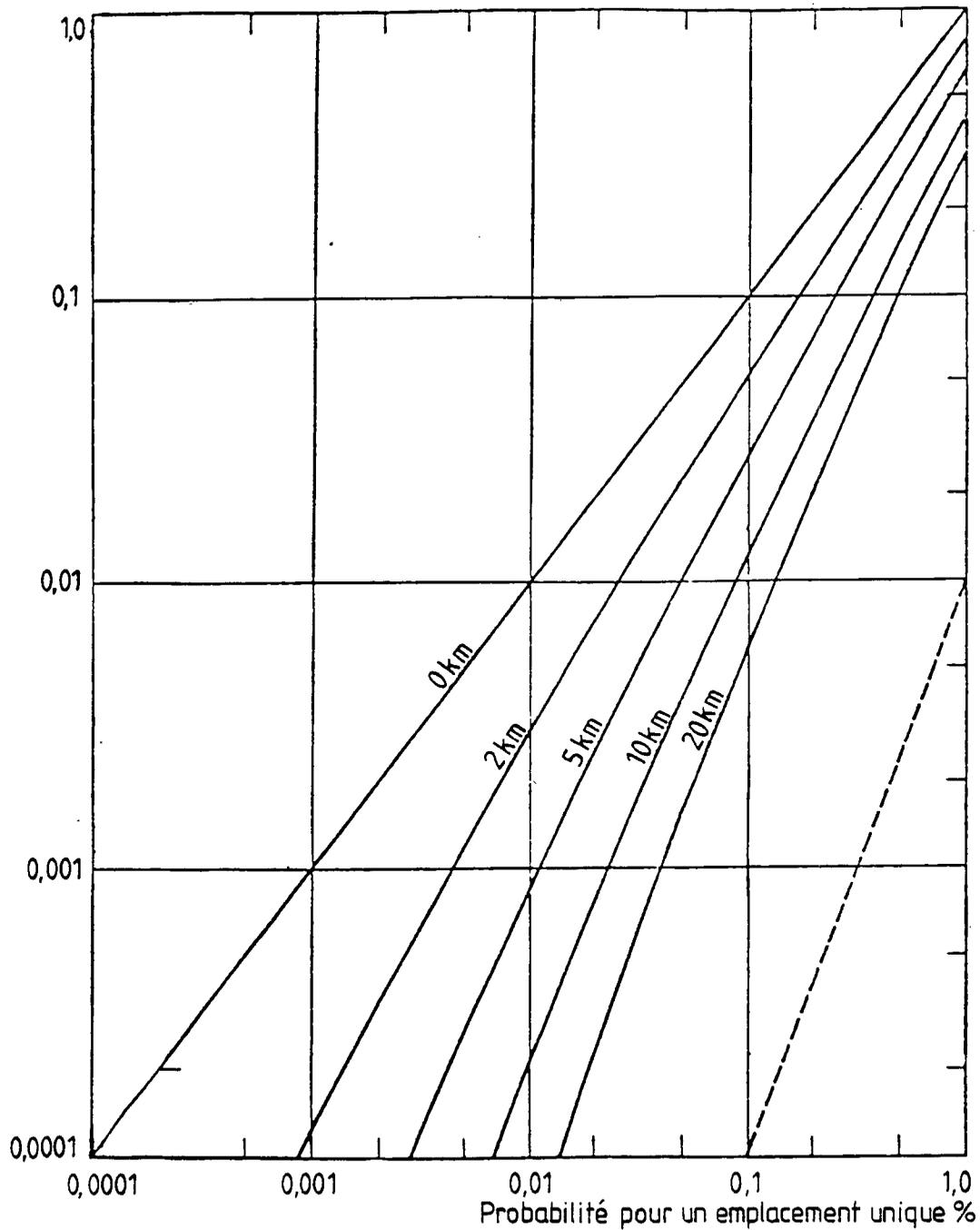


Figure 23: Probabilité pour que l'affaiblissement soit dépassé simultanément à deux emplacements de réception en diversité
 Combinaison de données recueillies par le Japon, le Royaume-Uni et les États-Unis à des fréquences de 11,6-35 GHz et à des angles de site de 22° à 50°
 Paramètre: espacement des deux emplacements de réception en diversité
 - - - - Cas limite de corrélation nulle entre les emplacements en diversité

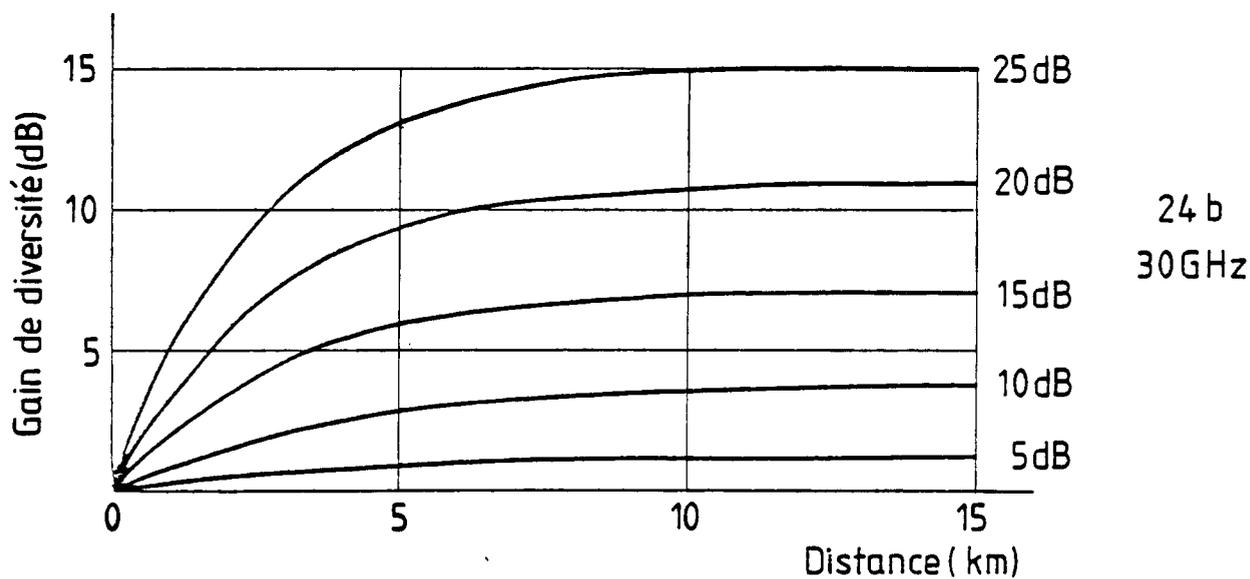
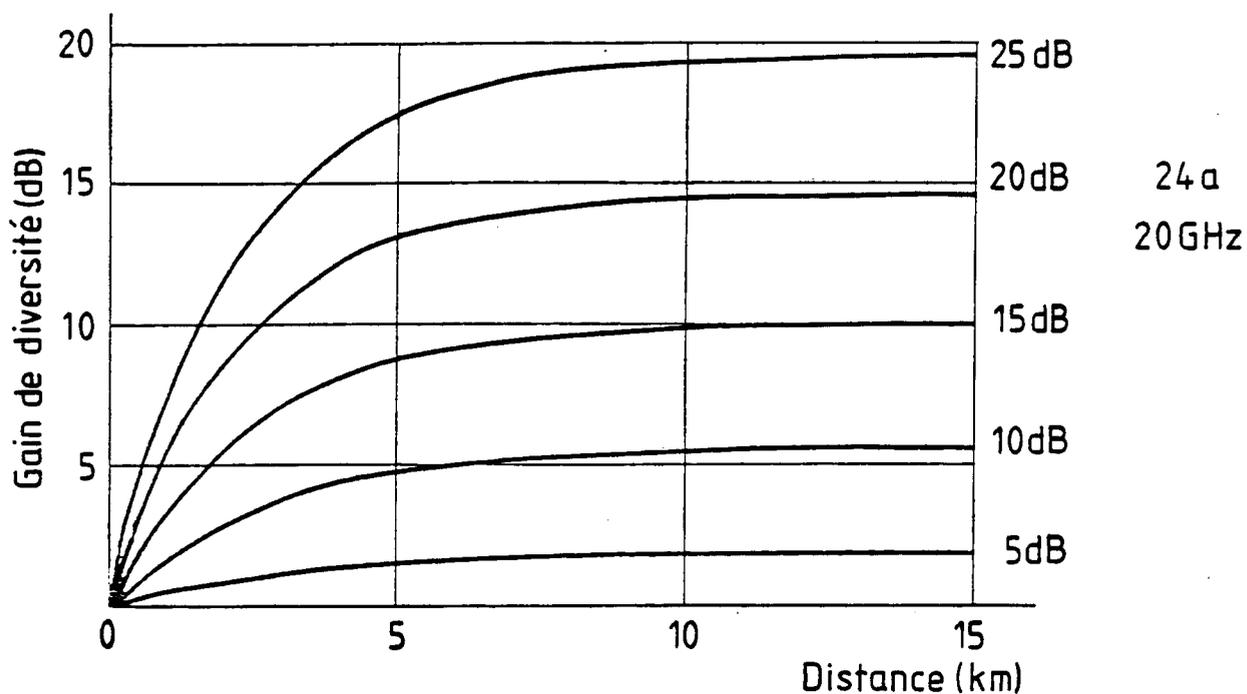


Figure 24: Gain de diversité en fonction de la distance à 20 et 30 GHz pour divers affaiblissements (Angle d'élévation : 35°)

