



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION
INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
I.C.T.P., P.O. BOX 586, 34100 TRIESTE, ITALY, CABLE: CENTRATOM TRIESTE



SMR.379/44

COURSE ON BASIC TELECOMMUNICATIONS SCIENCE

9 January - 3 February 1989

"PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE AND IONIZED MEDIA"
REFERENCES

DR. F. MOUPFOUMA
Avion Marcel Dassault
Breguet Aviation
Paris St. Cloud
FRANCE

CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS
Centre Paris B

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Département TOAE

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

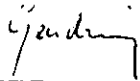
NOTE TECHNIQUE CRPE/164

**ETUDE DES PRECIPITATIONS ET DE LEURS EFFETS
SUR LES LIAISONS HERTZIENNES EN VISIBILITE
ET PAR SATELLITE DANS LES REGIONS TROPICALES**

par

F. MOUPFOUMA
RPE/ETP
38-40 rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX

Le Directeur


R. GENDRIN

Juillet 1988

Le Directeur Adjoint


M. BLANC

LISTE DE DIFFUSION SYSTEMATIQUE

CNET

MM. POITEVIN	Directeur du CNET
THABARD	Directeur Adjoint du CNET
COLONNA	Adjoint Militaire au Directeur du CNET
VINCENT-CARREFOUR	Directeur des Programmes
BLDCH	DICET
THUE	DICET
MME HENAFF	DICET
MM. LOMBARD	PAB
NOBLANC	PAB-BAG
RAMAT	PAB-ETR
GENDRIN	PAB-RPE
BAUDIN	PAB-RPE
BERTHELIER	PAB-RPE
BIC	PAB-RPE
BLANC	PAB-RPE
LAVERGNAT	PAB-RPE
ROBERT	PAB-RPE
ROUX	PAB-RPE
MME HAUSER	PAB-RPE
MM. TESTUD	PAB-RPE
LAURETTE	PAB-STC

CNRG

MM. BERROIR	TOAE
CHARPENTIER	SP1
MME SAHAL	TOAE
MM. COUTURIER	INSU
GLASS	INSU

CNES

MM. REVAH	
FELLOUS	
MME AMMAR	
CHABREUIL	
DEBOUZY	

Bibliotèques

CNET-SDI (3)
CNET-EDB
CNET-RPE (Issy) (6)
CNET-RPE (St Maur) (2)
Observatoire de Meudon
CNRS-SA
CNRS-COST
CNRS-LPCE

LISTE COMPLEMENTAIRE

CCETT	DOCUMENTATION
CCETT/SRL	CAPRON
CCETT/SRL	EVAIN
CCETT/SRL	FONTAINE
CCETT/SRL	JOLIFF
CCETT/SRL	LE DAIN
LAA/IFE	ARCHAMBAULT
LAA/TSS	FRANCESCO
LAB/DIA	LE MEZEC
LAB/MER	Secrétaire
LAB/MER	BRAYER
LAB/MER	HANBABA
LAB/MER	LE FADU
LAB/MER	MARTIN
LAB/MER	MEREL
LAB/MER	NIGER
LAB/MER	DUDART
LAB/MER	RENAN
LAB/SMR	BASSINET
LAB/SMR	GONZALES
LAB/SMR	PINAULT
PAB/DIA	LANGER
PAB/DIA	SOULIER
PAB/ETR	FERNANDEZ
PAB/ETR	RANCY
PAB/RPE	AMAYENC
PAB/RPE	BLU
PAB/RPE	DAUTRICHE (2)
PAB/RPE	MON
PAB/RPE	TESTUD
DTRE/TSP	MEUNIER
OTRN	FLOUS
TRT	RENARD

La présente Note Technique reproduit la Thèse de Doctorat d'Etat de l'auteur,
soutenue le 15 juin 1987 devant un jury composé de :

MM. DELOGNE
DUTRONC
GLASS
MON
SYLVAIN
THUE

PLAN

1ère partie

CHAPITRE A INTRODUCTION	7
I BUT DU TRAVAIL	7
II DESCRIPTION DU TRAVAIL	9
CHAPITRE B ETUDE DES PRECIPITATIONS	11
I CARACTERISTIQUES DES PRECIPITATIONS TROPICALES ET EQUATORIALES	11
I-1 Introduction	11
I-2 Différents types de pluies	11
I-3 Structure de la pluie	13
I-3-a Variations horizontales des précipitations	14
I-3-b Variations verticales des précipitations	16
II COLLECTE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES	17
II-1 Principe des mesures effectuées au moyen du pluviomètre	17
II-2 Mesures des précipitations par radar au sol	19
III PREVISIONS DES DISTRIBUTIONS DES INTENSITES DE PLUIE	20
III-1 Introduction	20
III-2 Relation entre intensité de pluie et durée d'observation	20
III-3 Modèles de prévisions	24
III-3-a Rappel des modèles existants	24
III-3-b Modèles proposés	24
3-b-1 Détermination du paramètre "u"	27
a- Première variante du modèle	28
b- Deuxième variante du modèle	32
III-4 Conclusion	34

IV	VARIATIONS DE L'INTENSITE DE PLUIE $R_{0,01}$ (mm/h) DANS DIVERSES REGIONS DES ZONES TROPICALES	35
IV-1	Introduction	35
IV-2	Etude du comportement de $R_{0,01}$ (mm/h)	35
IV-3	Atlas mondial des précipitations	36
V	COMPORTEMENT DES DISTRIBUTIONS DES INTENSITES DE PLUIE DES ZONES TROPICALES D'AFRIQUE PAR RAPPORT AUX DISTRIBUTIONS DECRIVANT LES ZONES TROPICALES N ET P DU CCIR	37
VI	SPECTRE DE GOUTTES DE PLUIE EN REGIONS TROPICALES	40
VI-1	Géométrie des gouttes de pluie	40
VI-2	Distributions des tailles des gouttes proposées pour les zones tropicales	42
VI-3	Vitesse limite de chute des gouttes de pluie	43
VI-4	Contribution des gouttes de pluie de différentes dimensions dans une intensité de pluie donnée	45
VI-5	Application	47
VI-5-1	Influence du spectre des gouttes de pluie sur le facteur de réflectivité radar dans les zones tropicales et équatoriales	47
VI-5-2	Comparaison des paramètres η et β pour différents types de pluie	49
VII	CONCLUSION DU CHAPITRE B	50
CHAPITRE C	EFFETS DES PRECIPITATIONS SUR LES SYSTEMES RADIOELECTRIQUES A ONDES CENTIMETRIQUES ET MILLIMETRIQUES	51
I	INTRODUCTION	51
II	INFLUENCE DE LA PLUIE SUR LA PROPAGATION DES ONDES HERTZIENNES	52
II-1	Phénomène d'absorption	52
II-2	Phénomène de diffusion	52
II-2-a	Etude de la diffusion par une goutte de pluie	52
II-2-b	Diffusion par un ensemble de gouttes et affaiblissement linéique dû à la pluie	57

III	DEPENDANCE DE L'AFFAIBLISSEMENT LINEIQUE VIS-A-VIS DE DIVERS PARAMETRES	58
III-1	Influence de la dimension maximale des gouttes de pluie	58
III-2	Influence de la température de l'eau de pluie	62
III-3	Influence de l'angle d'incidence de l'onde	62
III-4	Influence de la fréquence	62
IV	AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE SUR UN TRAJET TERRESTRE EN VISIBILITE DE LONGUEUR SUPERIEURE A 1 KM	69
IV-1	Influence de la structure horizontale	69
IV-2	Notion de longueur équivalente du trajet radioélectrique L_{eq}	69
V	AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE SUR UN TRAJET TERRE - ESPACE	72
VI	METHODES DE PREVISION DES AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE	73
VI-1	Liaisons terrestres	73
VI-2	Liaisons par satellite	74
VII	APPLICATION : DETERMINATION DU CHAMP D'UN EMETTEUR RADIOELECTRIQUE	75
VIII	CONCLUSION DU CHAPITRE C	77
CHAPITRE D	CONCLUSION GENERALE	79
BIBLIOGRAPHIE		82

2ème Partie
Annexes au Chapitre B

- Article 1** *MOUPFOUMA F.* : "Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical". *Annales des télécom.* (Fr), tome 37, n° 3 - 4, Mars - Avril 1982, pp. 123-128.
- Article 2** *MOUPFOUMA F.* and *de REFFYE J.* : "Empirical model for rainfall rate distribution", *Electron. Lett.*, 1982, Vol. 18, n° 11, pp. 460-461.
- Article 3** *MOUPFOUMA F.* : "Two parameter empirical model for rainfall rate distribution", *Electron. Lett.*, 1983, Vol. 19, n° 19, pp. 800-802.
- Article 4** *MOUPFOUMA F.* : "Model of rainfall rate distribution for radio system design", *IEE Proceedings*, Vol. 132, Pt. H, n° 1, Feb. 1985, pp. 39-43.
- Article 5** *MOUPFOUMA F.* : "More about rainfall rates and their prediction for radio systems engineering" (to appear in *IEE proceedings H -UK 1987*).
- Annexe 6** Etude des caractéristiques des précipitations à Douala (Cameroun)

Annexes au Chapitre C

- Article 7** *MOUPFOUMA F.* and *SPANJAARD N.* : "Rain effects on microwave communications in equatorial and tropical regions", *IEEE Globecom Conference Houston TX*, Dec. 1986, pp. 0.192-0.202.
- Article 8** *MOUPFOUMA F.* : "Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial links", *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, Vol. Ap 32, Dec. 1984, pp. 1368-1372.
- Article 9** *MOUPFOUMA F.* : "Rain induced attenuation prediction model for terrestrial and satellite earth microwave links", *Tome 42*, n° 9-10, Sept.-Oct. 1987, p. 539-550.

CHAPITRE A

INTRODUCTION

I-BUT DU TRAVAIL

Le développement spectaculaire des systèmes de radiocommunications : (faisceaux Hertiens en visibilité directe ou liaisons par satellite) lié aux besoins nouveaux en communication dus au couple informatique-télécommunications, a amené les administrations des PTT et autres services spécialisés à utiliser des fréquences de plus en plus élevées.

Les avantages des fréquences supérieures à 10 GHz sont bien connus. Outre l'accroissement du débit d'information qu'elles permettent, leur utilisation permet aujourd'hui de minimiser les brouillages entre liaisons terrestres et liaisons par satellite. L'attribution de bandes exclusives aux liaisons par satellites et la diminution des distances de séparation entre stations dans les bandes partagées facilite l'implantation des stations terriennes qui peuvent même être situées en plein milieu urbain à proximité des centres de trafic, alors que dans les bandes partagées des 4 et 6 GHz, les conditions de propagation imposent des distances de séparation élevées entre stations terriennes et stations de faisceaux hertiens en visibilité.

Ces systèmes en bande large sont cependant très sensibles aux phénomènes atmosphériques, ce qui peut constituer un handicap sérieux quand on n'en a pas fait une étude approfondie dans la région qu'on désire équiper. La planification et la mise en œuvre de ces systèmes nécessitent une connaissance approfondie des phénomènes de propagation qui conditionnent la disponibilité des liaisons et la qualité de service.

La pluie constitue la principale source de perturbation de la propagation des ondes centimétriques ou millimétriques. Pour des fréquences supérieures à 10 GHz, les gouttes de pluie se comportent comme un écran de diffuseurs qui affaiblissent l'intensité du signal par absorption et par diffusion. Lorsque la longueur d'onde devient inférieure à la dimension des gouttes, la liaison peut être complètement interrompue.

L'indisponibilité due aux anomalies de propagation des ondes à travers la pluie se caractérise par la dégradation des paramètres de transmission et la limitation des performances des systèmes. Cette dégradation a un impact sur la conception et le coût de ces systèmes.

Les affaiblissements dus à la pluie sont particulièrement sévères dans les régions tropicales et équatoriales qui connaissent la plus forte pluviométrie du globe, et auxquelles est consacrée la plus grande partie du présent travail.

Il n'existe pas de techniques à la fois efficaces et peu coûteuses qui permettent de se protéger des effets de la pluie. On peut cependant envisager diverses solutions telles que :

a) *Pour les faisceaux Hertzien terrestres*

- la diversité de trajet ; ce qui implique nécessairement un nombre plus élevé de relais, donc une augmentation importante du coût de la liaison.

- l'augmentation de la puissance d'émission; ce qui accroît les risques de brouillage des autres liaisons partageant le même plan de fréquence, brouillage dû à la puissance rayonnée par les lobes latéraux de l'antenne d'émission.

- la réduction de la longueur de bonds, par un accroissement du nombre de stations relais et donc du coût de la liaison

b) *Pour les liaisons par satellite*

- la diversité d'emplacements des stations terrestres; ce qui implique que l'on connaisse la dimension des cellules de pluie dans la région concernée, et entraîne un doublement des équipements donc du coût.

Toutes ces solutions sont très coûteuses et ne doivent être utilisées que si c'est indispensable. Il est donc rentable de procéder a-priori à des études de propagation sur le terrain. Ceci consiste à entreprendre dans la région où l'on envisage d'installer les-dits systèmes des campagnes de mesures des précipitations et de leurs effets, sur les différents paramètres intervenant dans la conception de ces systèmes.

Ces campagnes sont coûteuses en temps et en argent, et nécessitent des spécialistes ; aussi ne dispose-t-on pas toujours des données de propagation là où on le voudrait, c'est le cas de beaucoup de pays tropicaux, particulièrement en Afrique.

Pour pallier en partie cette carence, il est nécessaire d'élaborer des modèles statistiques ou semi-empiriques à partir de données collectées dans quelques régions caractéristiques et d'étudier comment elles peuvent s'adapter à d'autres régions du globe à l'aide des renseignements climatiques et pluviométriques disponibles.

Ces modèles, dont le but essentiel est de permettre aux ingénieurs de prendre en compte les phénomènes perturbant la propagation des ondes et donc de prendre les mesures permettant d'améliorer la qualité du service, doivent

- être simples à mettre en oeuvre
- avoir des bases physiques suffisantes
- permettre de tester les données en provenance de différentes régions, particulièrement pour les faibles pourcentages de temps qui sont les plus importants ;
- être souples d'emploi

Les régions tempérées et les régions tropicales présentent des caractéristiques climatiques très différentes, si bien que les règles d'ingénierie établies à partir d'études de propagation effectuées dans les zones tempérées ne sont pas transposables dans les pays des zones tropicales et équatoriales. La connaissance approfondie des conditions de propagation dans les régions tropicales et plus particulièrement des régions africaines est une nécessité pour les administrations des télécommunications qui souhaitent mettre en oeuvre des systèmes de radiocommunications performants et bien adaptés à leurs besoins.

II DESCRIPTION DU TRAVAIL

Le travail qui fait l'objet de cette thèse concerne l'étude des caractéristiques de la pluie et de ses effets sur la propagation des ondes centimétriques et millimétriques dans les régions tropicales et équatoriales.

Cette étude a consisté d'une part en des campagnes de mesures de propagation en Afrique (Cameroun, Congo) entreprise à l'initiative de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) en coopération avec le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET), et d'autre part en l'élaboration de modèles statistiques de

prévisions des phénomènes de propagation à partir des données disponibles. Ces modèles ont été testés avec des données provenant de différentes régions du monde tant dans le cadre du présent travail (voir articles en annexe) que par d'autres membres de la communauté scientifique. On constate que ces modèles construits à partir de données en provenance de régions tropicales sont également applicables aux zones tempérées.

Le chapitre B est consacré à l'étude des précipitations. On y décrit les caractéristiques des pluies tropicales, les différentes méthodes de collecte des données, les techniques de prévision des distributions cumulatives des intensités de pluie que nous proposons ainsi que l'atlas mondial des précipitations utile aux études de propagation radioélectrique. L'étude du spectre de gouttes de pluie en zone tropicale et de leur influence sur les paramètres de propagation est aussi développée dans le présent chapitre. Les articles consacrés à cette partie de l'étude et incluant les résultats de la campagne de mesures de pluie entreprises à Douala sont donnés en annexe.

L'influence de la pluie sur la propagation des ondes centimétriques et millimétriques est développée dans le chapitre C. Après un rappel de la théorie de l'interaction des ondes électromagnétiques avec les gouttes de pluie (théorie microscopique), on étudie le phénomène d'affaiblissement des ondes hertziennes par la pluie (phénomène macroscopique). On décrit ensuite les méthodes de prévision des affaiblissements. On donne en annexe les articles que j'ai écrits sur ces méthodes.

Le chapitre D constitue la conclusion générale.

CHAPITRE B

ETUDE DES PRECIPITATIONS

I CARACTERISTIQUES DES PRECIPITATIONS TROPICALES ET EQUATORIALES

I-1 Introduction

Les études de la microstructure de la pluie ont commencé à prendre de l'importance pour les spécialistes des radiocommunications et du radar pendant la deuxième guerre mondiale. Depuis, le développement des systèmes radioélectriques à ondes centimétriques et millimétriques aidant, cette importance n'a fait que s'accroître.

La pluie est l'un des phénomènes météorologiques les plus variables. Cette variabilité dans l'espace qu'elle couvre, dans sa fréquence d'occurrence ou dans sa durée lui confère une structure complexe particulièrement aux latitudes basses c'est-à-dire dans les zones tropicales.

L'utilisation des données de pluie n'est pas la même au sein de la communauté des ingénieurs en radiocommunications que chez les spécialistes de la météorologie. Les informations sur les données de pluie fournies par la plupart des services nationaux de météorologie représentent généralement des moyennes sur des grandes surfaces et sur un temps très long, et ne renseignent pas sur les fluctuations pendant de très courts instants. Par voie de conséquence, les données pluviométriques collectées par les météorologistes ne peuvent pas être utilisées directement telles quelles par les ingénieurs en télécommunications. C'est ce qui explique pourquoi malgré l'existence de banques de données dans les services météorologiques, les spécialistes en propagation continuent d'entreprendre des campagnes de mesures afin d'avoir une description plus fine de la structure de la pluie et de ses effets sur la propagation des ondes radioélectriques.

I-2 Différents types de pluies

La méthode la plus courante de classification des différents types de pluies repose sur l'étude des mécanismes de coalescence, et de condensation. Elle permet de distinguer deux types de pluie: les pluies convectives et les pluies stratiformes [Article 5].

Les pluies convectives se caractérisent par de très fortes intensités couvrant une surface assez limitée et durent relativement peu de temps. Elles résultent de l'instabilité de l'atmosphère due au très fort ensoleillement et à la très grande humidité qui caractérisent les zones tropicales, et sont aussi dus aux lignes de grains: une sorte de nappe convective constituée d'un front de fortes précipitations à l'avant, suivi de faibles précipitations étendues [Lemaître, 1981]. Elles se produisent quand des courants d'air ascendants, c'est-à-dire un mélange d'air chaud et humide, deviennent suffisamment forts (environ 100 km/h) localement pour donner naissance à un cumulo-nimbus. Les gouttes de pluie qui se forment au même moment au bas du nuage sont transportées par ces courants jusqu'à une altitude où leur concentration croît relativement vite (entre 15 et 20 minutes), puis sont violemment renvoyées vers le sol sous l'effet des forts courants descendants.

Les pluies stratiformes sont beaucoup plus étendues et se caractérisent par des intensités moyennes ou faibles. Elles peuvent durer pendant de très longues périodes ce qui se traduit par une pente moins abrupte de la distribution cumulative.

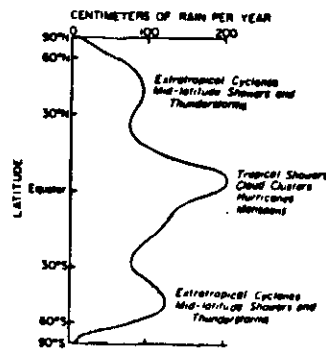


Fig. 1 : Moyenne globale annuelle des précipitation
(extrait de Houze, 1980)

Pour ces pluies, les courants ascendants qui maintiennent les nuages dans l'air sont si faibles que les gouttes qui se forment au sommet n'arrivent pas à s'y maintenir et tombent. Les pluies stratiformes caractérisent généralement les précipitations observées dans les régions extra-tropicales, à l'inverse des pluies convectives comme on peut le voir sur la figure 1 [article 9].

Les différents types de pluies sont étroitement associées aux différents types de nuages.

I-3 Structure de la pluie

La pluie est un phénomène très variable dans le temps et dans l'espace. Constituée de cellules de dimensions variables dans des plans superposés se déplaçant horizontalement, la pluie n'a pas une structure uniforme. Une cellule de pluie comporte un noyau de quelques kilomètres qui donne de très fortes précipitations et une zone plus étendue des précipitations qui donne de plus faibles intensités. La dimension du noyau dépend de l'importance de l'intensité de pluie et est donc essentiellement variable. Bien que la "cellule" ne soit pas le seul élément utilisé pour décrire la structure de la pluie, elle constitue cependant un élément essentiel pour l'étude de la diversité d'emplacement dans le cas des systèmes à satellites. De nombreux modèles théoriques décrivant le profil typique des "cellules" de pluie ont été établis à partir des données collectées dans des régions tempérées. Nous ne rappellerons ici que le profil exponentiel schématisé par la figure 2 et décrit par les relations suivantes [Fedi, 1979] :

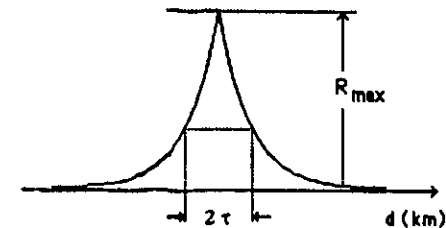


Fig. 2 : Profil exponentiel

- (1) $R(d) = R_{\max} \exp \left(- \frac{kd}{\tau} \right)$
- (2) $2\tau \leq d$

$R_{\max}$ représente l'intensité de pluie maximale dans le noyau de la "cellule", et $R(d)$ l'intensité observée en un point situé à une distance d (km). Les dimensions des "cellules" de pluie ne sont pas les mêmes en région tempérée et en région tropicale. Alors que dans les premières on évalue l'étendue maximale des précipitations résiduelles à une trentaine de kilomètres, au Congo (en zone équatoriale) nous avons observé en 1980 des pluies stratiformes couvrant des localités distantes de plus de 100 kilomètres. C'est la complexité des "cellules" de pluie, associée à leurs mouvements, qui expliquent les variations des taux de précipitations en fonction du temps en un point d'observation donné.

I-3-a Variations horizontales des précipitations

Un des problèmes essentiels dans l'évaluation des effets de la pluie sur les ondes radioélectriques est la valeur de l'intensité de pluie à prendre en compte sur le trajet de propagation. Une batterie de pluviomètres installés le long d'un trajet d'une cinquantaine de kilomètres à Montréal (Canada) [Rogers, 1976] a permis de représenter les variations de l'intensité de pluie en fonction de la distance séparant les pluviomètres d'une part et la probabilité d'occurrence des intensités de pluie d'autre part.

Dans le cadre de cette thèse nous avons exploité les résultats de ces mesures et nous représentons dans la figure 3 la probabilité conditionnelle $P_c(R_i, d)$ [en fonction de de l'intensité de pluie R (mm/h) et de la distance d (km) séparant les pluviomètres] qu'une certaine valeur d'intensité de pluie soit dépassée en un point, étant donné que la même intensité est dépassée en un autre point. Il convient de rappeler que le dépassement d'un seuil donné d'intensité de pluie, correspond au dépassement de toutes les valeurs des intensités de pluie incluses dans un intervalle dont la valeur minimale ici est 5 mm/h et la valeur maximale le seuil choisi. Une analyse de chacune des cinq courbes correspondant aux cinq intensités de pluie qui caractérisent cette figure 3, à savoir 5 mm/h, 10 mm/h, 20 mm/h, 30 mm/h, 50 mm/h, montrent que chacune d'elles peut être bien représentée par une relation exponentielle telle que :

$$(3) \quad P_c(R_i, d) = a(R_i) e^{b(R_i)d} \quad i = 1 \text{ à } 5$$

Le tableau 1 ci-dessous donne pour chacune des intensités de pluie R_i (mm/h) considérée ici, les valeurs correspondantes de a et b calculées par une méthode de régression linéaire.

R (mm/h)	5	10	20	30	50
a	0.7303	0.6439	0.5331	0.4845	0.4099
b	- 0.0189	- 0.0271	- 0.0323	- 0.0465	- 0.0689

Tableau 1 : Valeurs des paramètres a et b de la relation (3) en fonction de l'intensité de pluie R (mm/h)

Ce tableau montre bien que les variations des paramètres a et b sont liées à celles de l'intensité de pluie et un simple calcul de régression linéaire donne :

$$(4) \quad a = 1,12 R^{-0,25} \quad \text{et}$$

$$(5) \quad b = - 0,014 - 0,001R \quad \text{avec } R(\text{mm/h})$$

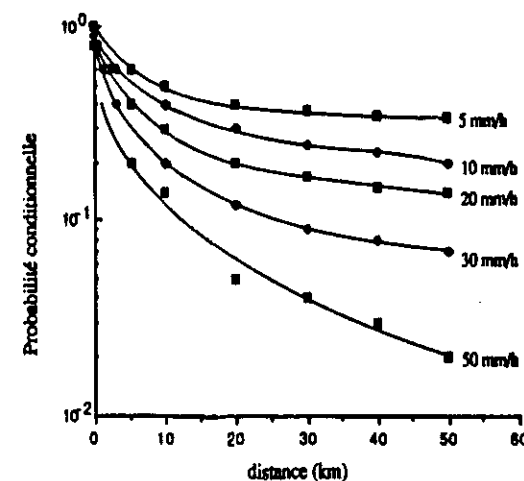


Fig. 3 : Probabilité conditionnelle qu'une certaine valeur d'intensité de pluie soit dépassée en un point étant donné que la même intensité est dépassée en un autre point

En définitive la probabilité conditionnelle qu'un seuil d'intensité de pluie soit franchi en un point de la liaison, étant donné que ce même seuil a été franchi en un autre point de cette même liaison est donnée par la relation :

$$(6) \quad P_p(R,d) = 1,12 R^{-0,25} e^{-(0,014 + 0,001R)d} \quad \text{avec } d \neq 0$$

où d(km) représente la distance séparant les deux points d'observation.

Les paramètres a et b ci-dessus étant liés à l'intensité de pluie, dépendent donc du régime hydrométéorologique. Par voie de conséquence, ceux définis pour les zones tempérées (c'est le cas ici), ne peuvent pas être utilisés de façon satisfaisante en zones tropicales.

L'intensité de pluie n'est pas répartie de façon uniforme sur un trajet de propagation donné. C'est pourquoi, comme on le verra plus loin, on utilise un facteur de correction du trajet radioélectrique qui donne "une longueur équivalente" sur laquelle on suppose par la suite que la pluie a une répartition uniforme.

I-3-b Variations verticales des précipitations

Les observations à l'aide des radars ont montré que la structure verticale des précipitations se caractérise généralement par l'existence de deux régions situées de part et d'autre de la "bande brillante" laquelle se situe approximativement à la hauteur de l'isotherme 0°C.

Lorsqu'on étudie l'effet de la pluie sur les liaisons par satellite, on suppose comme on va le voir [Articles 7 et 9] que la pluie a une structure uniforme du sol jusqu'à une certaine hauteur H_R qui représente la moyenne de la hauteur de l'isotherme 0°C en période de pluie. Celle-ci varie avec la latitude du site de la station, l'intensité de pluie et les saisons. On trouvera plus loin son expression approximative recommandée par le C.C.I.R. [Articles 7,9].

Les données collectées dans deux localités de la zone tropicale d'Afrique à savoir Bangui (République Centrafricaine) et Douala (Cameroun) pendant la saison des pluies, montrent [Article 7] que la hauteur de l'isotherme zéro varie en fonction du temps et est liée à d'autres phénomènes atmosphériques telle que la pression.

Ces données montrent d'autre part [Article 7] que l'isotherme zéro est en général plus élevée aux basses latitudes que dans les régions tempérées. Par voie de conséquence, les précipitations prennent leur origine beaucoup plus haut en milieu tropical qu'en milieu tempéré. La relation suivante de H_R recommandée par le CCIR semble donc inadaptée pour le calcul des affaiblissements relatifs à la pluie sur des liaisons par satellite en régions tropicales.

Cette relation qui ne dépend que de la latitude est telle que :

$$(7) \quad H_R(\text{km}) = \begin{cases} 4 & \text{pour } 0 < \phi < 36^\circ \\ 4 - 0,075 (\phi - 36) & \text{pour } \phi \geq 36^\circ \end{cases}$$

où ϕ représente la latitude (degrés).

II COLLECTE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Au vu de ce qui vient d'être dit sur la structure de la pluie, il est clair qu'obtenir des données de pluie avec autant de détails et de précision que l'on voudrait est difficile, voire même impossible à moins d'utiliser des moyens très importants.

Les moyens conventionnels les plus utilisés au sol sont le pluviomètre et le radar.

II-1 Principe des mesures effectuées au moyen du pluviomètre

Compte-tenu du fait que nous n'utilisons [voir Annexe 6] que les données collectées au moyen du pluviomètre à augets basculants, il ne sera fait état ici que du fonctionnement de ce type de collecteur.

Le pluviomètre à augets basculants (PLA) a une surface de captation S de 400 cm² ou de 1000 cm². Chaque auge a un volume V de 20 cm³ et bascule lorsque la hauteur d'eau V/S qu'il contient est de 0,5 mm pour une surface de captation de 400 cm² ou de 0,2 mm pour une surface de captation de 1000 cm².

Chaque basculement de l'auge provoque un contact électrique dans une ampoule de mercure située à l'intérieur du pluviomètre et envoie une impulsion électrique sur un enregistreur papier ou sur un dispositif électronique d'acquisition de données plus

sophistiqué comme le système Argos (collecte de données par satellite), ou le système SAB (système autonome de collecte de données) qui ont été tous les deux utilisés lors de la campagne de mesures de propagation à Doula (Cameroun) et dont on trouvera les détails dans l'Annexe 6.

Chacun de ces deux dispositifs d'acquisition compte le nombre de basculements des augets enregistrés par intervalle de temps Δt (min) telle que :

$$(8) \quad R = \frac{n V}{s \Delta t} \quad \text{mm}/\Delta t$$

où n est le nombre de basculements dans l'intervalle de temps Δt qui représente le temps d'intégration du pluviomètre.

Les données collectées au moyen des pluviomètres sont affectées par des erreurs, notamment celles dues à la nature du terrain. Selon l'emplacement du pluviomètre, les données collectées peuvent être représentatives d'une surface plus ou moins grande suivant la présence ou non dans l'environnement immédiat de chaînes montagneuses, des bâtiments, des grands arbres, des grandes étendues d'eau, la pente du terrain sur lequel est installé le pluviomètre, l'altitude de l'emplacement.

Le vent constitue également un facteur qui contribue de façon significative aux erreurs des données collectées au moyen du pluviomètre.

Les différences observées dans les mesures effectuées à l'aide de différents types de pluviomètres semblent très faibles pour des pluies stratiformes (intensités inférieures à 100 mm/h) [Barret et Martin, 1981], alors que pour de grosses averses, seuls des pluviomètres à faible constante de temps donnent de bons résultats, le temps d'intégration des intensités étant très faible de l'ordre d'une minute au plus.

L'utilisation de plusieurs pluviomètres espacés permet de mieux cerner les "cellules" de pluie et d'approximer leurs dimensions. Elle permet aussi d'avoir le maximum d'informations sur la distribution ponctuelle des pluies (distribution en différents points de mesures) dans la localité qui accueillera la future liaison hertzienne ou par satellite.

Ces informations renseignent sur la structure horizontale des précipitations mais pas sur leur structure verticale qui nécessite l'utilisation d'un radar.

II-2 Mesures des précipitations par radar au sol

Le radar ne mesure pas directement l'intensité de pluie, celle-ci se calcule à partir du facteur de réflectivité.

L'utilisation du radar pour la mesure quantitative des précipitations nécessite soit un couplage avec un disdromètre qui mesure la taille des gouttes de pluie au sol, soit l'utilisation d'une batterie de pluviomètres installés au sol le long d'un axe dans la direction du faisceau du radar.

Le radar doit opérer à une fréquence non atténuée, c'est-à-dire qu'on est sous l'hypothèse de Rayleigh ($D/\lambda \ll 1$ où D (cm) et λ (cm) représentent respectivement le diamètre de la goutte de pluie et la longueur d'onde du radar).

Dans le premier cas (radar plus disdromètre), on mesure d'une part le champ de réflectivité équivalente Z_e (voir plus loin) à bas site jusqu'à une distance d'environ 150 km, et d'autre part grâce à des mesures effectuées avec le disdromètre, on détermine la répartition du spectre de gouttes de pluie (chapitre C). L'intensité de pluie R (mm/h) se déduit alors du champ Z_e par une relation (Z_e-R) (voir plus loin). L'incertitude sur la valeur de R ainsi déterminée est importante et elle peut varier d'un facteur 10 suivant la relation (Z_e-R) utilisée [Amayenc, 1986].

Dans le deuxième cas (radar plus pluviomètres), le principe consiste à mesurer d'une part la réflectivité au moyen du radar, et d'autre part des intensités de pluie ponctuelles au moyen des pluviomètres. Le radar fournit la répartition spatiale des précipitations (par une conversion ($Z-R$) appropriée) tandis que les pluviomètres fournissent l'intensité de la pluie aux points de référence. Il n'y a pas de relation universelle ($Z-R$), l'utilisation d'une relation donnée nécessite la prise en compte des erreurs aléatoires qui lui sont dues et qui se répercutent sur l'estimation de R (mm/h). Des méthodes d'ajustement permettent de réduire les écarts entre les intensités de pluie R (mm/h) estimées à partir des données radar et celles mesurées au moyen des pluviomètres, et d'estimer la valeur de l'intensité de pluie en différents points au sol dans la direction du faisceau radar. La précision des résultats obtenus reste cependant limitée [Amayenc, 1986].

L'utilisation des satellites d'observation permet de couvrir des surfaces plus étendues et d'éviter les écueils observés au sol. Mais, si le satellite peut fournir des données avec une meilleure résolution spatiale, les temps d'intégration sont trop longs et les données

obtenues ne représentent pas les intensités au niveau du sol, c'est-à-dire dans la zone où les ondes hertziennes sont les plus affectées.

La solution idéale consiste à associer un radar et des pluviomètres, mais elle est évidemment très coûteuse.

III PREVISIONS DES DISTRIBUTIONS DES INTENSITES DE PLUIE

III-1 Introduction

Un des problèmes majeur qui se pose quand on entreprend l'étude de faisabilité d'une liaison hertzienne en visibilité directe ou par satellite, est de disposer de données de pluie dans la région concernée afin d'une part d'estimer le pourcentage de temps pendant lequel (au cours d'une année moyenne) les phénomènes d'absorption et de diffusion sont importants, d'autre part de déterminer pour la même période la durée pendant laquelle les spécifications du système seront en dessous de leur niveau acceptable (selon les normes du C.C.I.R.) à cause des effets dus à la pluie.

Malheureusement les données sont insuffisantes dans de nombreuses régions et en particulier dans la zone tropicale. Qui plus est, entreprendre une campagne de mesures de propagation dans une région donnée avant d'y installer une liaison radioélectrique est très coûteux pour plusieurs raisons :

- 1) coût des systèmes d'acquisition des données (voir section II)
- 2) variabilité des phénomènes qui implique des mesures de très longue durée
- 3) emploi d'un personnel spécialisé

Il n'est donc pas surprenant que les spécialistes en propagation travaillent à l'élaboration de méthodes de prévisions de distributions cumulatives des intensités de pluie. Nous en rappelons un certain nombre ci-dessous et nous les comparons à celles que nous proposons et qui font l'objet des articles 1 à 5.

III-2 Relation entre intensité de pluie et durée d'observation

Quand on analyse des données de pluie on a affaire à un certain nombre de paramètres dont les plus importants sont :

- l'intensité de pluie $R(\text{mm/h})$
- la durée pendant laquelle on dépasse le seuil d'intensité $R_s(\text{mm/h})$: δ_u (heure)
- le nombre de fois où on a dépassé le seuil fixé $R_s(\text{mm/h})$: N
- la durée totale de la campagne de mesures: T

Ces paramètres permettent de déterminer la durée totale t (heures) pendant laquelle on a dépassé le seuil $R_s(\text{mm/h})$ durant la campagne de mesures

$$(9) \quad t = \sum_{i=1}^N \delta_{u_i} \quad (\text{heures})$$

Dans l'analyse, on est amené en définitive à considérer seulement deux paramètres qui sont l'intensité de pluie $R(\text{mm/h})$ et la fraction de temps pendant laquelle une valeur donnée de cette intensité a été franchie durant toute la campagne de mesures.

On définit la fraction de temps par la relation

$$(10 a) \quad \frac{t}{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{u_i}}{T}$$

d'où l'on déduit le pourcentage de temps $P(\%)$ de dépassement du seuil tel que :

$$(10 b) \quad P(\%) = 100 * \frac{t}{T}$$

L'analyse des données du tableau 1 [Article 5] qui représentent les distributions cumulatives des intensités de pluie dans une vingtaine de localités situées pour moitié en régions tropicales et en régions tempérées, nous a montré que l'on peut approximativement représenter ces distributions d'intensités de pluie par la relation :

$$(11 a) \quad R = \frac{q}{P(\%)^u} \quad \text{mm/h}$$

où q et u sont des paramètres dépendant de la région climatique considérée.

A titre d'exemple, la figure 4 montre que les intensités de pluie mesurées à Korhogo en Côte d'Ivoire (climat équatorial) peuvent être décrites par la relation :

$$(11-b) \quad R(\text{mm/h}) = 29,8 P(\%)^{-0,30}$$

tandis que sur la figure 5 on observe que les intensités de pluie à Mendlesham au Royaume-Uni peuvent-être représentées par la relation :

$$(11-c) \quad R(\text{mm/h}) = 1,48 P(\%)^{-0,53}$$

Comme on peut le voir dans l'article [5], q a une valeur beaucoup plus grande en zone tropicale qu'en zone tempérée, et de plus varie beaucoup dans une même région climatique.

On peut par contre donner au paramètre v sa valeur moyenne qui est égale à 0.50 en zone tempérée et 0.3 en zone tropicale, l'écart type étant de l'ordre de 10% de cette moyenne quelle que soit la zone.

L'étude approfondie du comportement de q nécessite la prise en compte de nombreux facteurs tels que, le relief de la localité considérée, le type de pluie, etc... qui sont en dehors de l'objet de ce travail, et nous aborderons le problème d'une autre manière.

Pour conclure ce paragraphe nous retiendrons simplement que :

1) Dans les régions tropicales les intensités de pluie sont inversement proportionnelles à la racine cubique des pourcentages du temps de dépassement

$$(12 a) \quad R(\text{mm/h}) \propto \frac{1}{p(\%)^{1/3}}$$

2) Dans les régions tempérées elles sont inversement proportionnelles à la racine carrée des pourcentages du temps de dépassement

$$(12 b) \quad R(\text{mm/h}) \propto \frac{1}{\sqrt{P(\%)}}$$

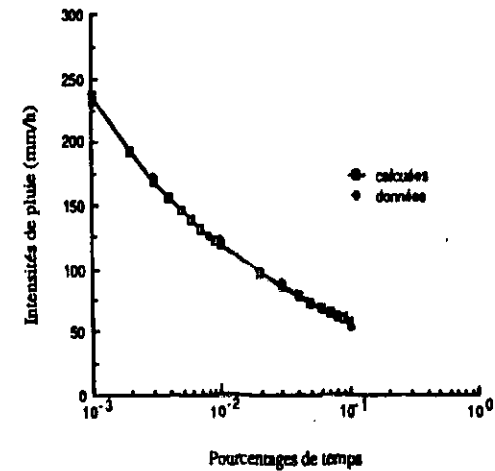


Fig. 4: Approximation de l'intensité de pluie en fonction du pourcentage de temps à Korbogo (COTE d'IVOIRE) en région équatoriale

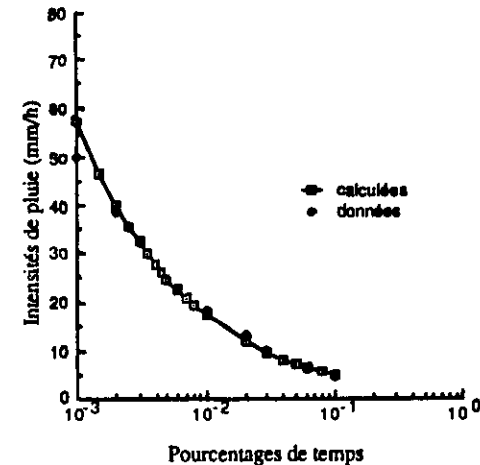


Fig.5 : Approx.de l'intensité de pluie en fonction de P(%) à Mendlesham (Zone tempérée)

III-3 Modèles de prévisions

III-3-a Rappel des modèles existants

La distribution cumulative de l'intensité de pluie est constituée de trois parties, à savoir : le début de la distribution qui correspond aux faibles intensités de pluie c'est-à-dire aux forts pourcentages de temps ; le milieu de la distribution qui correspond aux moyennes intensités de pluie, et la queue de la distribution qui correspond aux fortes intensités de pluie, c'est à dire aux faibles pourcentages de temps.

Les modèles de distribution les plus connus sont la loi log-normale et la loi Gamma. La première donne une très bonne approximation des faibles et moyennes intensités de pluie, tandis que la seconde représente bien les fortes intensités de pluie.

Cependant ni l'une ni l'autre ne sont applicables de façon globale dans de nombreuses régions climatiques.

La loi log-normale semble adaptée pour les régions d'Europe et d'Amérique du Nord, tandis que la loi Gamma conviendrait mieux au Japon.

La description complète de l'ensemble de la distribution des intensités de pluies nécessite l'utilisation conjointe de ces deux lois. La jonction des deux distributions asymptotiques obtenues se fait vers 20 à 50 mm/h selon les climats, ce qui paraît gênant pour les applications car ces valeurs ont une grande importance pratique (fig.6).

D'autres modèles de prévision ont été proposés, notamment celui de Rice-Holmberg, celui de Dutton-Dougherty, ou encore celui de Segal [Article 5]. Ceux-ci sont cependant des modèles étudiés pour l'Amérique du Nord et ne peuvent pas être appliqués de façon satisfaisante à certaines régions du monde.

III-3-b Modèles proposés

Une analyse de données de pluie collectées au Congo nous a amené à montrer que la distribution des intensités de pluie peut être décrite dans toute la gamme de valeurs utiles par une loi de probabilité expérimentale qui approche une distribution log-normale pour les faibles et moyennes intensités de pluie, et une distribution gamma pour les intensités de pluie élevées [Article 1].

Cette loi décrite par la relation

$$(13) \quad P(R \geq r) = a \frac{e^{-ur}}{r^b} \quad r \geq 2 \text{ mm/h}$$

avec $0 < a < 1$, $0 < u < 1$ et $b > 0$ a été théoriquement justifiée [Article 2]. Nous avons comparé sur la figure 6 les intensités de pluie collectées à Paris avec les approximations faites avec la loi log-normale, la loi gamma [Boithias 1983] et le modèle donné par la relation (13).

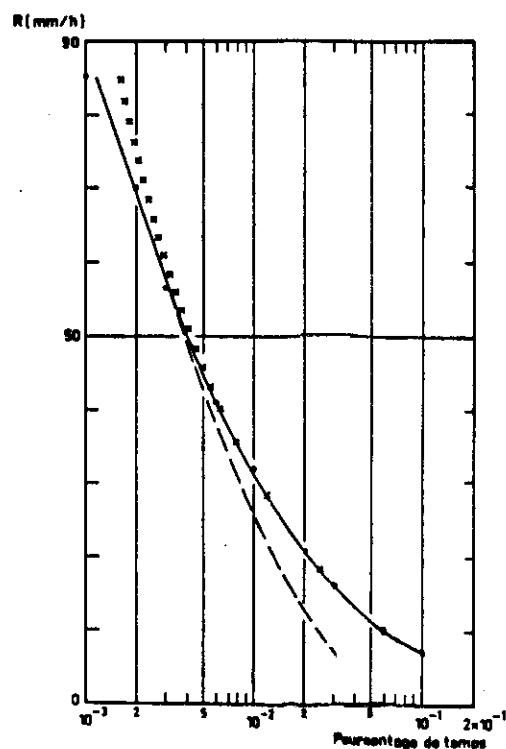


Fig.6 :Statistiques de pluie -Paris (FRANCE) 1975 -1977

- Données expérimentales
- + + + Approximation lognormale $P_0(\%) = 5$
- — Gamma $\gamma = 2,2 \cdot 10^{-4}$ $R_0 = 40 \text{ mm/h}$
- relation (13) $a = 1,32 \cdot 10^{-2}$; $b = 1,27$; $u = 1,62 \cdot 10^{-2}$

Comme on peut le noter la relation (13) qui est en parfait accord avec les données expérimentales sur toute la distribution, coïncide bien avec la loi Gamma au-delà de 50 mm/h, tandis que pour des intensités de pluie inférieures ou égales à 50 mm/h, le modèle que nous proposons se superpose asymptotiquement à la loi log-normale.

Nous avons ensuite entrepris l'étude du comportement du paramètre b en fonction de l'intensité de pluie. Cette étude a montré que b est lié à l'intensité de pluie observée pendant 0,01% du temps $R_{0,01}$ (mm/h) quel que soit le temps d'intégration par la relation [Article 4] :

$$(14) \quad b = 8,22 R_{0,01}^{-0,584}$$

En exprimant le paramètre "a" pour $P = 0,01\%$ à partir de la relation (13) en fonction de $R_{0,01}$, on peut écrire (13) sous la forme [Article 4]

$$(15) \quad P(R \geq r) = 10^{-4} \left(\frac{R_{0,01}}{r} \right)^b \exp \left(u r \left(\frac{R_{0,01}}{r} - 1 \right) \right)$$

Le modèle ainsi défini est régi par deux paramètres :

- 1) L'intensité de pluie $R_{0,01}$ (mm/h) pour 0,01% du temps, qui décrit la forme de la distribution
- 2) "u" qui donne la pente.

Lorsque l'on connaît ces deux paramètres pour une localité donnée, on peut calculer la distribution cumulative de la pluie dans cette localité.

L'utilisation de $R_{0,01}$ (mm/h) paraît intéressante dans la mesure où le CCIR a publié des isocontours de cette intensité de pluie pour différentes régions du monde. Dans les cas où l'on ne dispose pas de la valeur de $R_{0,01}$ (mm/h) pour la localité étudiée, on peut utiliser les cartes du CCIR. L'utilisation de la méthode décrite par les relations (14) et (15) repose ainsi sur la détermination de u .

3-b-1 Détermination du paramètre u

Dans une première approche [Article 4], il nous est apparu que pour $u = 2,5 \cdot 10^{-2}$, le modèle correspondant aux relations (14) et (15) décrivait de façon satisfaisante les distributions des intensités de pluie dans un grand nombre de localités situées à l'intérieur

des continents, alors que pour des régions voisines de grandes masses d'eau (régions côtières, îles...) ou des régions situées dans des terrains accidentés (montagnes, collines, etc...). Cette valeur de "u" ne donnait pas de résultats satisfaisants.

Pour obtenir une description plus fine des distributions des intensités de pluie, c'est-à-dire pour avoir une pente adaptée au plus grand nombre possible de localités, nous avons dans une deuxième approche entrepris l'étude du paramètre u de deux manières différentes. En définitive, nous avons abouti à deux variantes du modèle décrit par les relations (14) et (15), leurs particularités respectives étant induites par l'expression de u.

a) Première variante [Article 5]

Outre les contours d'égale intensité de pluie pour $R_{0,01}$ (mm/h) (fig.7, 8), le CCIR a proposé une carte (fig.9, 10) divisant le monde en plusieurs zones hydrométéorologiques, chacune d'elles étant caractérisée par une distribution d'intensités de pluie qui représenterait la moyenne des intensités de pluie dans les localités contenues dans cette zone. Un examen de cette carte et du tableau 3 [Article 5] montre que c'est dans les zones D à P qu'il pleut réellement, les zones A, B et C étant peu pluvieuses, voire même glaciaires ou désertiques. Nous allons nous intéresser aux zones D à P parmi lesquelles les zones D, E, F, G, H, J, K, L, M correspondent aux régions tempérées, tandis que N et P correspondent au climat tropical. Une analyse des distributions de pluie décrivant chacune de ces zones montre que le modèle décrit par les relations (14), (15) ne peut être utilisé de façon satisfaisante que si "u" est considéré comme une fonction de l'intensité de pluie r (mm/h).

Compte-tenu des résultats de l'analyse des distributions de pluie décrivant chacune de ces zones, une méthode de régression nous conduit à l'expression la plus satisfaisante de u [Article 5]

$$(16) \quad u = \lambda r^{-s}$$

λ et s étant des paramètres décrivant chacune des zones, et dont on trouvera les valeurs dans le tableau 4 [Article 5].

La figure 11 sur laquelle on a donné les valeurs approchées de u correspondant à la zone L (valeurs que l'on trouvera dans le tableau 5 [Article 5]) calculées à l'aide de (16) avec $\lambda = 0.05$ et $s = 0.22$ montre qu'il y a un bon accord entre les valeurs expérimentales et théoriques.

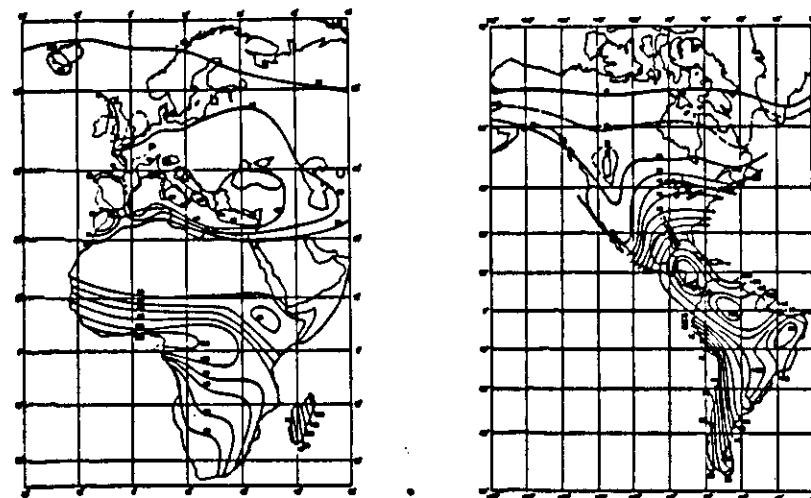


Fig. 7: Contours de l'intensité des précipitations pour 0,01% du temps CCIR R 563-3

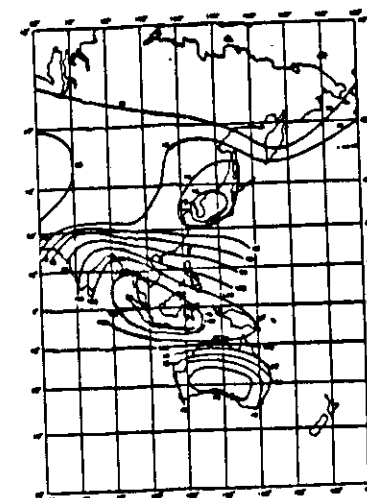


Fig. 8: Contours de l'intensité des précipitations pour 0,01% du temps CCIR R 563-3

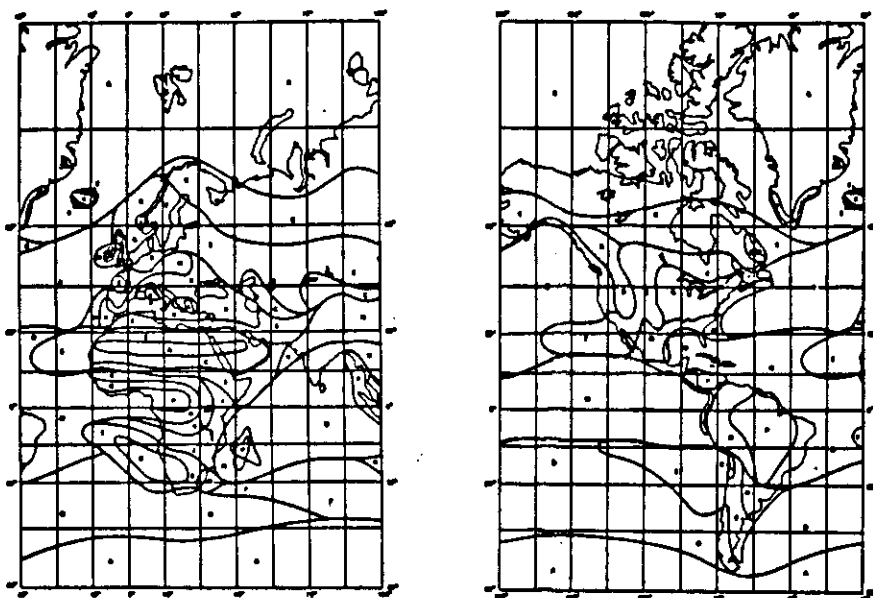


Fig.9: Zones hydrométéorologiques
CCIR R 563-3

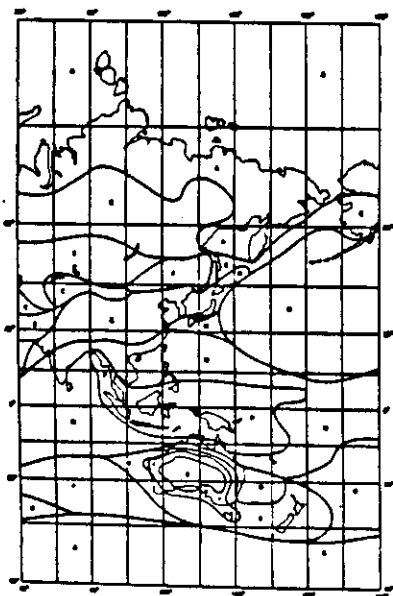


Fig.10: Zones hydrométéorologiques
CCIR R 563-3

En remplaçant u dans (15) par son expression (16), on obtient la relation décrivant la première variante du modèle [Article 5].

$$(17) \quad P(R \geq r) = 10^{-4} \left(\frac{R_{0,01}}{r} \right)^b \exp \left(\lambda r^{1-b} \left(\frac{R_{0,01}}{r} - 1 \right) \right)$$

b étant défini par la relation (14). On a maintenant un modèle à trois paramètres, $R_{0,01}$, λ , b .

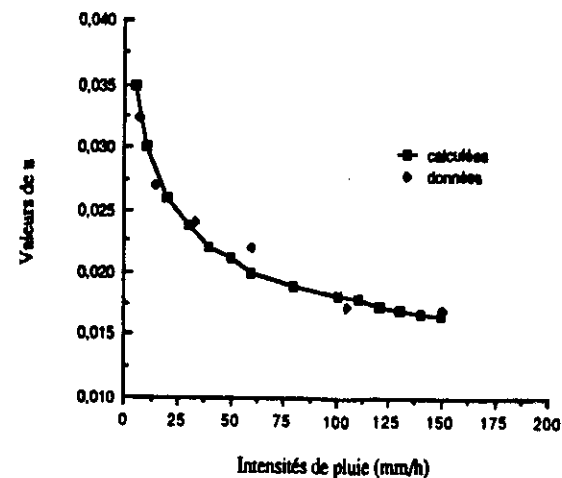


Fig. 11: Représentation de u dans la zone L du CCIR

Donc, si l'on connaît d'une part la zone hydrométéorologique à laquelle appartient la région dans laquelle on envisage d'installer une liaison hertzienne par satellite ou terrestre, et d'autre part, si possible en consultant les courbes du CCIR la valeur de $R_{0,01}$ (mm/h) qui caractérise cette région, on peut y approximer la distribution de la pluie en utilisant la distribution décrite par les relations (14) et (17) et le tableau (4) de l'article 5.

Comme on peut le noter (voir figures 3, 4 [Article 5]), d'une part les données recueillies à Belém (Brésil) et Darwin (Australie) qui font partie de la zone tropicale P, et d'autre part les données obtenues à Dijon (France) et Madrid (Espagne) qui appartiennent à la zone H du CCIR sont en très bon accord avec les résultats fournis par le modèle que nous venons de décrire (relation 17).

Ces zones définies par le CCIR sont malheureusement trop étendues pour prendre en compte les micro climats caractérisant certaines régions. C'est pourquoi cette première variante peut ne pas donner des résultats satisfaisants pour certaines localités.

b - Deuxième variante [Article 5]

Les Océans, les grands lacs, tout comme les montagnes influent sur la climatologie des régions riveraines. Pour prendre en compte leurs effets dans l'élaboration de notre modèle, nous avons utilisé les données de pluie mesurées dans 162 localités réparties comme suit : 4 en Afrique, 60 en Amérique, 30 en Asie, 27 en Australie, 40 en Europe et 1 au moyen orient [article 5]. Nous ne nous sommes intéressés qu'aux intensités de pluie correspondant à des pourcentages de temps s'étendant de 0,001% à 1% parce que, d'une part les intensités de pluie correspondant à des pourcentages de temps inférieurs à 0,001 sont dues à des événements rares et sont généralement entachées d'erreurs, d'autre part au delà de 1 % du temps, les affaiblissements observés ne sont plus vraiment liés aux intensités de pluie observées au niveau du sol.

En analysant ces données, il nous est apparu que la relation (15) peut donner une bonne description des distributions des 162 points de mesures si l'on remplace le paramètre u par un couple de valeurs (u_1 , u_2) tel que u_1 décrive les fortes intensités de pluie et u_2 les intensités faibles et moyennes. De plus le changement de pente qui correspond au passage des fortes vers les moyennes et faibles intensités de pluie se situe aux alentours de la valeur 0,01%. On prendra donc :

$$(18) \quad u = \begin{cases} u_1 & \text{pour } P(\%) \leq 0,01 \\ u_2 & \text{pour } P(\%) > 0,01 \end{cases}$$

u_1 confère à la relation (15) un comportement asymptotique gamma, tandis que u_2 lui assure un comportement asymptotique log-normal.

Le comportement de (u_1 , u_2) est lié à l'environnement géographique de la localité concernée. Les 162 couples de valeurs (u_1 , u_2) que nous avons étudiés montrent que :

- 1) (u_1 , u_2) ont des valeurs élevées sur les côtes, ou près des grandes étendues d'eau ; dans des îles et près des montagnes.
- 2) A l'intérieur des terres ces valeurs sont plus faibles.

On peut interpréter ces résultats en disant que dans le premier cas les pentes des distributions de pluie sont plus faibles, tandis que dans le deuxième cas, elles sont plus

fortes, ce qui paraît logique dans la mesure où sur les côtes, les pluies sont stratiformes, tandis que à l'intérieur des terres on a plutôt des pluies convectives.

Nous avons ainsi divisé les différentes régions du monde pour lesquelles nous disposons des données de pluie en 10 classes, chacune des classes étant décrite par un couple de valeurs de u pour la plus grande partie du globe (fig. 3 à 6 [article 5]). Cet atlas, associé aux contours de $R_{0,01}$ (mm/h) donnés par le CCIR (à moins qu'on connaisse la valeur de $R_{0,01}$ (mm/h) dans la région étudiée) et à la deuxième variante de notre modèle décrite par les relations (4), (15) et (18) nous paraît constituer un outil de travail utile pour les ingénieurs chargés de la planification des systèmes de radiocommunications. La figure 12 qui compare les données de Danang (Vietnam) et les données de PK 45 (Congo) avec les résultats tirés de la deuxième variante de notre modèle révèle un bon accord. Ce bon accord que l'on note aussi avec les données collectées à Buenos Aires en Argentine [Hirsch, Romanelli 1984] sur la figure 13, ou encore avec la distribution cumulative des intensités de pluie mesurées à Douala (Cameroun) [Fig.8 Annexe 6] apparaît aussi sur les figures 7 à 9 de l'article 5.

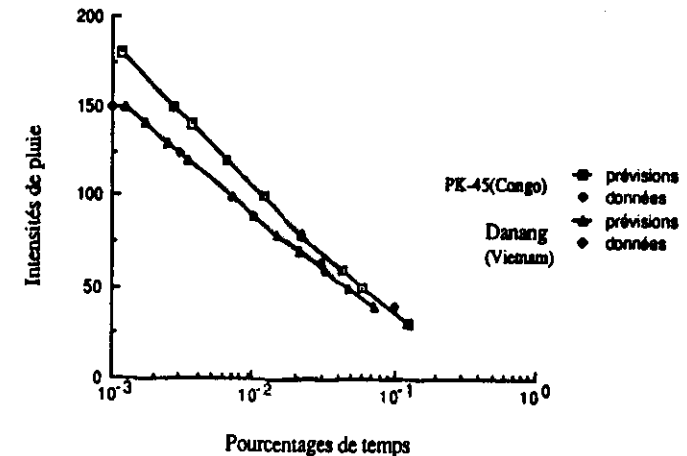


Fig.12: Distributions cumulatives des intensités de pluie en zone tropicale à PK-45 (CONGO) & Danang (VIETNAM)

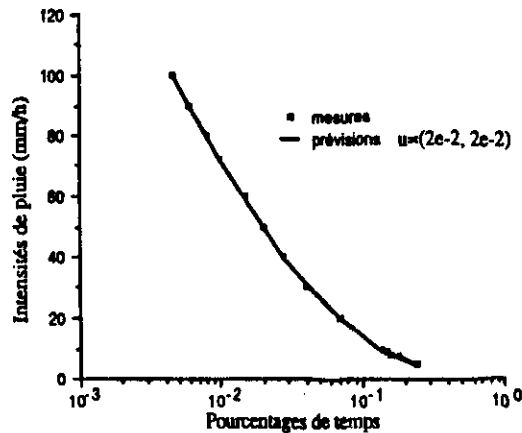


Fig. 13: Distribution cumulative des intensités de pluie en zone tempérée
Buenos Aires (ARGENTINA)

III-4 Conclusion

On a présenté ci-dessus un modèle de distribution des intensités de pluie comportant deux variantes, chacune étant décrite par trois paramètres : $R_{0,01}$ et (λ, s) ou (u_1, u_2) .

- La première variante est régie par la relation $u = \lambda/r^s$ définie à partir des zones hydrométéorologiques du CCIR. Elle semble autant appropriée pour des localités intérieures à des zones du CCIR que pour des régions pour lesquelles on ne dispose pas de données de pluie. Elle permet de donner une description grossière approchée de la distribution des intensités de pluie à l'intérieur d'une zone quelconque du CCIR.

- La deuxième variante donne une description plus fine des intensités de pluie pour les régions repertoriées dans l'Atlas que nous proposons.

Quand les paramètres $R_{0,01}$ et (λ, s) ou (u_1, u_2) sont bien choisis, l'une ou l'autre variante du modèle proposé ici permettent d'estimer de façon satisfaisante la distribution des intensités de pluie dans toute la gamme des valeurs utiles et quelle que soit la localité ; ce qui ne s'obtient pas en utilisant seulement la loi log-normale ou la loi Gamma.

IV VARIATIONS DE L'INTENSITE DE PLUIE $R_{0,01}$ (mm/h) DANS DIVERSES REGIONS DES ZONES TROPICALES

IV-1 Introduction

L'intensité de pluie $R_{0,01}$ (mm/h) observé pendant 0,01% du temps constitue un paramètre d'une grande importance à la fois dans la prévision des intensités de pluies [Articles 4, 5] et dans le calcul des affaiblissements dus à la pluie [Articles 8, 9]

Considérée par le CCIR comme l'intensité dont la valeur dans les régions tempérées est connue avec une assez bonne précision, $R_{0,01}$ a fait l'objet dans le rapport 563 du CCIR de courbes d'isocontours établies pour les régions du monde pour lesquelles on dispose de données.

En ce qui concerne les régions tropicales, particulièrement celles d'Afrique, ces isocontours (fig. 7, 8) sont peu précis, car elles ont été établies à partir d'extrapolations entre données peu nombreuses.

IV-2 Etude du comportement de $R_{0,01}$ (mm/h)

Sans vouloir en tirer des conclusions définitives, nous avons essayé d'analyser le comportement de $R_{0,01}$ (mm/h) mesurée dans 10 localités situées entre les latitudes 22° Nord et 22° Sud et représentées dans le tableau 2. Les 10 localités sont rangées dans le tableau 2 en fonction de leur latitude par rapport à l'équateur.

Localités	Latitudes	$R_{0,01}$ (mm/h)
Hong-Kong	22°2 N	88
Danang (Vietnam)	16°04 N	90
Ile Ife (Nigéria)	7°5 N	90
Douala (Cameroun)	4°04 N	115
Singapour	1°3 N	124
Manaus (Brésil)	1°27 S	88
Belém (Brésil)	3°06 S	100
Brazzaville (Congo)	4°14 S	105
Darwin (Australie)	12°23 S	130
Innisfail (Australie)	17°30 S	142

Tableau 2 : Valeurs de $R_{0,01}$ (mm/h) en région tropicale

Au vu de ce tableau, il apparaît qu'aux latitudes Nord, plus on s'éloigne de l'équateur plus les valeurs de l'intensité de pluie $R_{0,01}$ (mm/h) diminuent. Cette observation semble logique pour deux raisons : la première est que c'est en région équatoriale que l'on observe les plus fortes pluies du globe et que celle-ci s'étend au Nord de l'équateur jusqu'aux alentours de la latitude 10°N . La deuxième raison est qu'en montant en latitude, on tend vers les zones tempérées qui ont une pluviométrie moins importante.

L'analyse des données des latitudes Sud montre au contraire que plus on s'éloigne de l'équateur, plus les intensités sont fortes. Ceci paraît très surprenant et va à l'encontre des théories établies selon lesquelles les plus fortes précipitations s'observent aux basses latitudes. Même s'il n'est pas possible de comparer les données du Brésil à celle de l'Australie, on observe pourtant qu'à Innisfail les intensités de pluies sont plus fortes qu'à Darwin qui est situé 5° plus au Nord. Il en est de même entre Manaus et Belém au Brésil. Une analyse plus approfondie de cette situation nécessiterait des précisions sur la géographie de chacune de ces localités qui comme nous l'avons dit dans les sections précédentes, influe considérablement sur la pluviométrie des localités environnantes.

IV-3 Atlas mondial des précipitations

Les ingénieurs en radiocommunications ayant la responsabilité de planifier les systèmes hertziens terrestres ou par satellites ont besoin de disposer des données de pluie dans toute la gamme de pourcentages de temps utiles, afin de calculer les affaiblissements et autres perturbations.

Pour les y aider, nous avons proposé [article 5] un atlas des valeurs du paramètre u intervenant dans le modèle donné par les relations (9) [article 5] qui, associé aux isocontours du CCIR permet la prévision des intensités de pluie pour des pourcentages de temps de 1 à 0,001.

En ce qui concerne les régions tropicales d'Afrique, des données de pluie complémentaires collectées dans d'autres régions du continent, en particulier dans les régions du Centre telle le Rwanda ou le Burundi, les régions de l'Est telle le Kenya, et celles situées au Nord de l'équateur dans l'intervalle des latitudes 0° à 10° sont nécessaires pour l'élaboration des courbes d'égale intensité de pluie pour 0,01% du temps et d'un atlas adapté à cette partie du monde.

V COMPOTEMENT DES DISTRIBUTIONS DES INTENSITES DE PLUIE DES ZONES TROPICALES D'AFRIQUE PAR RAPPORT AUX DISTRIBUTIONS DECRIVANT LES ZONES TROPICALES N ET P DU CCIR

Comme nous l'avons déjà dit, le CCIR a divisé le monde en un certain nombre de zones hydrométéorologiques dont deux seulement représentent les régions tropicales, le reste décrivant les régions tempérées. Dans cette section, nous comparons sur les figures 14, 15 et 16 les distributions des intensités de pluie de trois localités africaines aux distributions qui décrivent les zones N et P du CCIR.

Ces localités : Douala (Cameroun), Korhogo (Côte d'Ivoire) et PK-45 (Congo) situées de part et d'autre de l'équateur entre les latitudes 10°N et 10°S bénéficient d'un climat équatorial c'est-à-dire de la variante la plus sévère du climat tropical. PK-45 et Korhogo sont des localités situées à l'intérieur du continent, tandis que Douala est une ville côtière [Annexe 6].

Selon le CCIR [1986] (voir fig. 9), PK-45 située au sud de l'équateur appartient à la zone N, tandis que Douala et Korhogo sont dans la zone P.

La figure 14 montre un parfait accord entre la distribution des intensités de pluie à PK-45 et celle qui décrit la zone N du CCIR. Sur la figure 15 on remarque que la distribution des intensités de pluie à Korhogo est intermédiaire entre les distributions décrivant les zones N et P.

La figure 16 fait ressortir quant à elle une situation plus complexe. On y remarque en effet, que pour des forts pourcentages de temps (au-delà de 0,07%) la distribution des intensités de pluie à Douala se situe au-dessus des deux distributions proposées par le CCIR. Entre environ 0,005% du temps et 0,07%, la distribution des intensités de pluie à Douala est intermédiaire à celles des zones N et P, tandis qu'en dessous de 0,005% elle coïncide avec celle de la zone N avec une tendance à passer en dessous de cette zone pour des pourcentages de temps inférieurs à 0,001%.

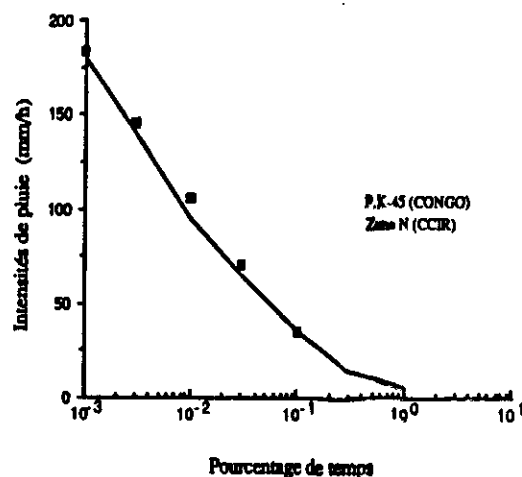


Fig. 14: Comparaison de la distribution des intensités de pluie à PK-45 (CONGO) avec celle de la zone N du CCIR

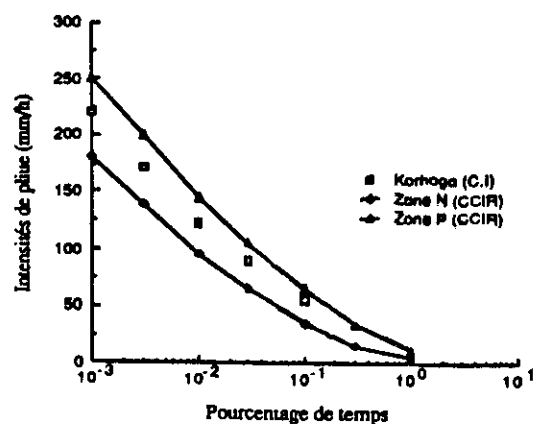


Fig. 15: Comparaison de la distribution des intensités de pluie à Korhogo (COTE D'IVOIRE) avec celles des zones N & P du CCIR

Une analyse de ces trois figures permet de noter que, les localités côtières plus propices aux pluies stratiformes [Annexe 6], sont décrites par des distributions dont les faibles et moyennes intensités de pluie ont des pentes moins abruptes que celles des pluies convectives. Elles ne peuvent donc pas être décrites de façon satisfaisante avec les distributions qui caractérisent les zones N et P. Une troisième zone hydrométéorologique décrivant les distributions cumulatives des intensités de pluie le long des côtes serait donc nécessaire.

Les zones N et P reflètent mieux la situation à l'intérieur du continent où les pluies de convection sont plus fréquentes. Cependant la distribution qui caractérise la zone P a tendance à surestimer les fortes intensités de pluie qui ne sont dues en fait qu'à des événements plus fréquents.

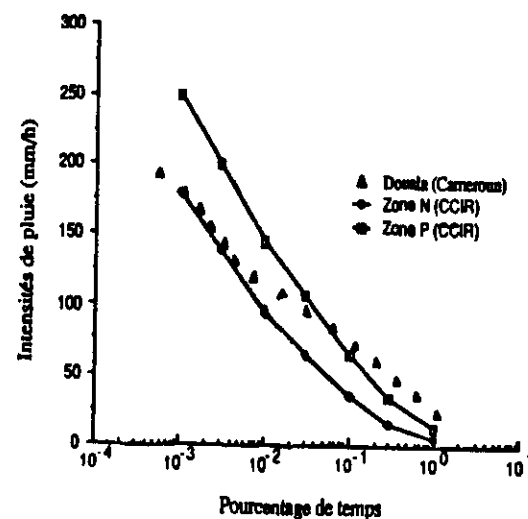


Fig. 16: Comparaison de la distribution des intensités de pluie à Douala (CAMEROUN) avec celles des zones N & P du CCIR

VI SPECTRE DE GOUTTES DE PLUIE EN REGIONS TROPICALES

L'étude du spectre des gouttes de pluie a commencé en 1895 avec les travaux de Wiesner qui utilisa la technique dite "du papier absorbant". Cette technique consistait à installer sous la pluie du papier filtre saupoudré de teinture, afin d'évaluer la dimension des gouttes. Elle eut de nombreux adeptes parmi lesquels Marshall et Palmer [1948].

Une autre technique tout aussi célèbre fut celle dite "de la farine" dont les travaux les plus remarquables furent ceux de Laws et Parsons [1945]. Celle-ci consistait, à partir d'un moule contenant de la farine, à y mesurer les dimensions des boulettes produites par les gouttes d'eau de pluie.

Bien que des techniques très modernes bénéficiant de l'apport de l'électronique soient apparues depuis, les résultats des travaux ci-dessus demeurent toujours d'actualité.

VI-1 Géométrie des gouttes de pluie

La géométrie des gouttes de pluie a fait l'objet d'une étude théorique et expérimentale par Pruppacher et Pittner [1971]. Cette étude montre que la dimension des gouttes de pluie dépend de la condensation de la vapeur d'eau, de la fusion des gouttes et de la taille maximum au delà de laquelle celles-ci éclatent.

Les gouttes de pluie passent de la forme sphérique à une forme sphéroïdale aplatie sous l'effet des forces de pesanteur et de résistance de l'air, de vents horizontaux ou même des forces électriques qui agissent sur elles lors de leur chute vers le sol (fig.17).

Des mesures effectuées au moyen de radars ont permis de remarquer que la dimension des gouttes de pluie est très variable et que la concentration de gouttes moyennes et grosses est moins importante en altitude qu'aux environs du sol. C'est en cela du reste que les intensités de pluie mesurées au sol au moyen d'un pluviomètre sont mieux adaptées pour le calcul des affaiblissements comme on le verra dans le chapitre C que celles observées au moyen d'un radar, ou d'un satellite.

La forme des gouttes de pluie influe sur l'affaiblissement des ondes. Lorsque l'angle entre l'onde et l'axe principal de la goutte vaut 90° (cas des liaisons terrestres), l'affaiblissement en polarisation horizontale est plus important qu'en polarisation verticale.

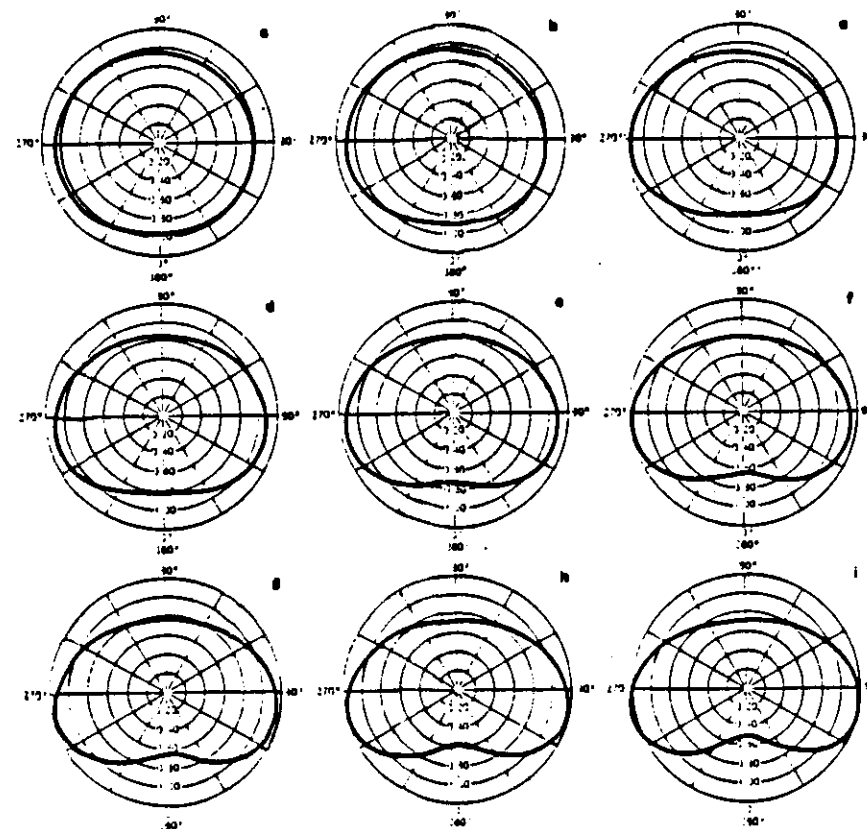


Fig.17: Formes calculées de gouttes d'eau de rayons équivalents respectivement égaux à 1,1 - 1,4 - 1,8 - 2 - 2,5 - 2,9 - 3 - 3,5 - et 4 mm.

VI-2 Distributions des tailles des gouttes proposées pour les zones tropicales

L'un des paramètres les plus importants est le spectre des gouttes qui caractérise les pluies dans la région concernée, c'est à dire la répartition des gouttes en fonction de leurs dimensions pour une intensité de pluie donnée.

La distribution des gouttes de pluie la plus connue est celle de Marshall-Palmer qui utilisant les résultats des travaux de Laws et Parsons, ont montré que le spectre de gouttes de pluie peut être décrit par la relation exponentielle suivante :

$$(19) \quad N(a,R) = N_0 e^{-\Lambda a}$$

où a est le rayon de la goutte.

$$(20) \quad \text{avec } \Lambda = \Lambda_0 R^{-\beta}$$

N_0 , Λ_0 et β sont des constantes données dans le tableau 3, tandis que $R(\text{mm/h})$ représente l'intensité de pluie. Ce modèle de distribution, bien qu'étudié pour des régions tempérées est rappelé ici parce qu'il sert de référence.

Joss [1968] fut le premier à proposer un modèle de distribution de gouttes adapté aux pluies d'orage. Son modèle dont on trouvera les caractéristiques dans le tableau 3 ne diffère de celui de Marshall-Palmer que par la valeur des coefficients numériques.

Des études menées dans les régions tropicales d'Afrique, respectivement au Congo par nous et au Nigéria par Ajayi et Olsen, ont amené à proposer d'autres distributions de gouttes [article 7]. Alors que notre modèle qui est également représenté par une exponentielle négative (tableau 3) fait ressortir que pour la même intensité de pluie, on note plus de grosses gouttes en région tropicale qu'en zone tempérée, la distribution proposée par Ajayi-Olsen sous forme d'une fonction gamma, fait ressortir au contraire qu'il y aurait plus de petites gouttes en zone tropicale qu'en zone tempérée. Le spectre de gouttes d'Ajayi-Olsen a tendance à surestimer plus que ne le fait la distribution de Marshall-Palmer, le nombre de gouttes petites et moyennes, tandis que notre modèle de distribution privilégie quant à lui, les grosses gouttes.

$N_0 \text{ (cm}^{-4}\text{)}$	$\Lambda \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Distributions
0,16	$82 R^{0,21}$	Marshall Palmer
0,028	$60 R^{0,21}$	Joss - orage
0,0523	$70,4 R^{0,23}$	Moupfouma

Tableau 3. Distributions des gouttes de pluie

Des travaux récents [Beard et al, 1986] dans la région d'Hawaï (en zone tropicale) ont permis d'observer au cours de nombreux orages, des gouttes de pluie pouvant atteindre un diamètre de 8mm. Ceci tend à confirmer nos propres conclusions.

La complexité de la structure de la pluie en zone tropicale et l'insuffisance des travaux de recherche qui y sont consacrés ne permettent cependant pas de tirer des conclusions définitives sur le modèle de distribution des gouttes de pluie le mieux adapté.

VI-3 Vitesse limite de chute des gouttes de pluie

La vitesse limite de chute des gouttes de pluie constitue un paramètre important dans l'évaluation de l'intensité de pluie.

Pour qu'une goutte de pluie tombe d'un nuage, il faut que ses dimensions lui permettent d'atteindre une vitesse limite supérieure à celle des courants ascendants.

C'est pourquoi, on peut admettre qu'en dessous d'un rayon minimum de l'ordre de 150 μm les gouttes de pluie ont une vitesse nulle et restent en suspension dans l'air.

Une des expressions mathématiques de la vitesse limite de chute de gouttes les plus connues est celle proposée par Gunn et Kinzer et que l'on trouvera en annexe [article 7].

Une analyse des données du tableau 4 collectées par Kerr [1951] nous a amené, en considérant que toutes les gouttes ont un rayon équivalent "a" à montrer que la vitesse limite de chute des gouttes peut également être décrite par la relation :

$$(21) \quad v(a) = \eta + \beta \cdot \log_e(a)$$

avec $\eta = 29,31 \text{ m/s}$ et $\beta = 3,31 \text{ m/s}$ pour $a \leq 0,00175 \text{ m}$
 $\eta = 22,26 \text{ m/s}$ et $\beta = 2,2 \text{ m/s}$ pour $a > 0,00175 \text{ m}$

Cette relation, comme celle de Gunn et Kinzer est empirique. En effet, une description complète de la vitesse des gouttes nécessiterait la prise en compte de l'influence du vent. Ceci paraît difficile du fait du manque de données.

La figure 18 montre un bon accord entre les vitesses calculées à partir de la relation 21 et celles données par le tableau 4.

Rayons	Vitesse terminale m / sec
0,0025	2,1
0,05	3,9
0,075	5,3
0,1	6,4
0,125	7,3
0,15	7,9
0,175	8,35
0,2	8,7
0,225	9
0,25	9,2
0,275	9,35
0,3	9,5
0,325	9,6

Tableau 4. Vitesses terminales de chute des gouttes d'après Kerr [1951]

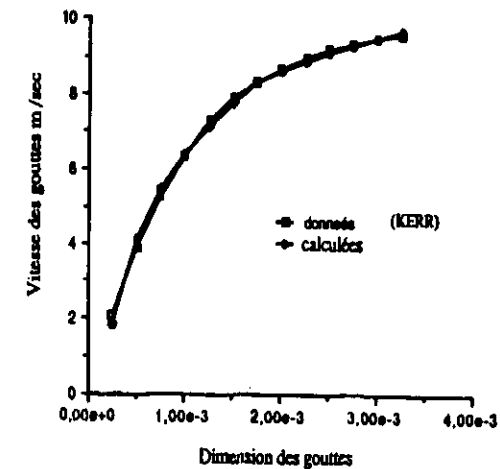


Fig. 18 : Vitesse terminale de chute des gouttes de pluie
 Comparaison des calculs (relation 21) et des mesures

VI-4 Contributions des gouttes de pluie de différentes dimensions dans une intensité de pluie donnée

L'intensité de pluie est donnée par le volume d'eau qui tombe sur une surface. Elle intervient dans la forme des modèles de spectre des gouttes, et une bonne loi de distribution de celles-ci doit être telle que l'intensité de pluie vérifie la relation :

$$(22) \quad R = \frac{4\pi}{3} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N(a,R) V(a) a^3 da$$

où $N(a,R)$ représente la distribution des gouttes de rayon a et de vitesse $V(a)$.

La relation (22) sera considérée comme valable en l'absence de vent vertical. En utilisant le spectre de gouttes de Marshall-Palmer dans la relation (22) et la relation donnant

la vitesse limite de chute de gouttes de pluie donnée en (21) ou celle de Gunn et Kinzer, on aboutit dans l'un et l'autre cas à la même conclusion schématisée par la figure 19 où l'on note que : quelle que soit l'intensité de pluie, la contribution des gouttes ayant un rayon compris dans l'intervalle 0,5 mm à 2 mm est la plus importante en comparaison à celle des autres gouttes. Ceci s'explique par la densité de ces gouttes dans une distribution donnée.

La figure 20 compare les intensités de pluie calculées à partir de la relation (22) avec les valeurs nominales des intensités de pluie de 100, 150 et 200 mm/h. Les calculs ont été effectués en utilisant la distribution de gouttes que nous proposons avec d'une part la vitesse de chute des gouttes de Gunn et Kinzer (G.K.) et d'autre part celle donnée par la relation (21). Les résultats de cette figure complètent ceux illustrés par la figure 19. On voit en effet qu'à partir d'un certain seuil de la valeur du rayon des gouttes, l'intensité de pluie tend vers la saturation qui correspond à sa valeur nominale. Ce seuil de dimension maximale des gouttes, croît avec l'intensité de pluie et dépend du spectre des gouttes.

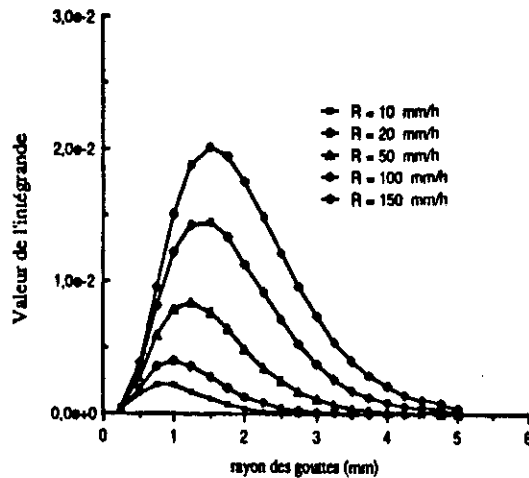


Fig. 19 Contribution des gouttes dans une intensité de pluie donnée

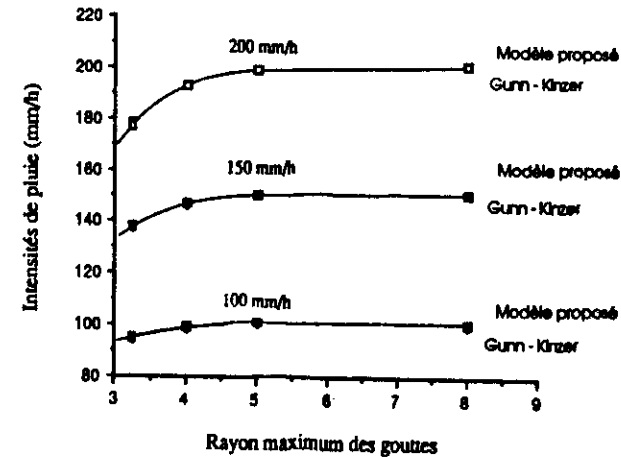


Fig. 20: Variations de $R(\text{mm/h})$ en fonction de la dimension maximale des gouttes

Les figures 19 et 20 montrent en définitive que si l'on prend un rayon maximal ($a_{\max}$) très grand (infini), on ne commet pas d'erreur significative dans la relation (22). De même, les toutes petites gouttes pouvant être considérées comme sans vitesse, une sommation dans la relation (22) à partir de $a_{\min} = 0$ permet de prendre en compte toutes les gouttes de pluie animées d'une certaine vitesse.

VI-5 Application

VI-5-1 Influence du spectre des gouttes de pluie sur le facteur de réflectivité radar dans les zones tropicales et équatoriales

Une fois le spectre de gouttes de pluie connu, le facteur de réflectivité radar Z peut se calculer à partir de la relation [Amayenc, 1986]

$$(23) \quad Z = \int_0^{D_{\max}} N(D, R) D^6 dD$$

où $D = 2a$ représente le diamètre de la goutte de pluie.

Si l'on utilise le type de distribution décrite par les relations (19, 20) on a :

$$(24) \quad Z = \int_0^{D_{\max}} N(D, R) D^6 dD = N_0 \left(\frac{720}{\Lambda} - \Phi(D, \Lambda) \right) \quad \text{mm}^6 / \text{m}^3$$

avec

$$\Phi(D, \Lambda) = -e^{-\Lambda D_{\max}} \left(\frac{D_{\max}^6}{\Lambda} + 6 \frac{D_{\max}^5}{\Lambda^2} + 30 \frac{D_{\max}^4}{\Lambda^3} + \frac{120}{\Lambda^4} \zeta(D) \right)$$

et

$$\zeta(D) = \frac{1}{\Lambda} \left(D_{\max}^3 + 3 \frac{D_{\max}^2}{\Lambda} + 6 \frac{D_{\max}}{\Lambda^2} + \frac{6}{\Lambda^3} \right)$$

Pour $D_{\max}$ infini, l'expression de $\Phi(D, \Lambda)$ s'annule et alors

$$(25) \quad Z = N_0 \int_0^{\infty} D^6 N(D, R) dD = \frac{720}{\Lambda} N_0 \quad \text{mm}^6 / \text{m}^3$$

Par convention les mesures des intensités de pluie sont données par $R(\text{mm/h})$. De nombreux travaux sur la mesure des précipitations à l'aide de radars proposent des relations empiriques de la forme :

$$(26) \quad Z = \eta R^\beta$$

entre le facteur de réflectivité Z , proportionnel à la puissance détectée par le radar (dans le cas de l'approximation de Rayleigh) et l'intensité de pluie R . Une comparaison des relations (26) et (25) montre que le paramètre η dépend de N_0 .

Le modèle de distribution de gouttes de pluie que nous proposons peut s'écrire en terme de diamètre :

$$(27) \quad \begin{cases} N_0 = 2615 \quad (\text{m}^3 \text{mm}^{-1}) \\ \Lambda = 3.52 R^{-0.23} (\text{mm}^{-1}) \end{cases}$$

A partir des relations (26) et (27), par un calcul de regression, on a :

$$(28) \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} \eta = 281 \quad \text{et} \quad \beta = 1.6 \\ Z = 281 R^{1.61} \end{cases}$$

VI-5-2 Comparaison des paramètres η et β pour différents types de pluie

De nombreux auteurs ont proposé selon le type de pluie, les valeurs de η et β que l'on trouvera dans le tableau 5. On y remarque en ce qui concerne la valeur de β , qu'elle est peu sensible au type de pluie et que celle que nous proposons est en bon accord avec les autres valeurs.

Types de pluie	Auteurs	η	β
Bruine	Joss (1970)	140	1.5
Pluie stratiforme	Joss (1970)	250	1.5
Pluie d'orage	Harrold (1965)	350	1.6
Pluie d'orage (COPT 1981)	Amayenc Hauser (1982)	343	1.6
Distribution de pluie continue 2 ans (CONGO)	Moupfouma	281	1.6

Tableau 5

Cependant la valeur de η que nous obtenons est intermédiaire entre les valeurs correspondant aux orages et aux pluies stratiformes.

L'explication réside en ce que nous n'avons pas dissocié les événements des pluies d'orage de ceux des pluies stratiformes lors de la campagne de mesures au Congo qui a servi à l'établissement du modèle, contrairement à ce que les autres auteurs ont fait.

On voit ainsi l'importance de la fonction de distribution de gouttes de pluie et son influence sur le paramètre η .

VII CONCLUSION DU CHAPITRE B

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté un modèle de prévision des intensités de pluie ayant deux variantes d'application que les utilisateurs jugeront sur leurs précisions dans la modélisation et sur leur souplesse. S'il est vrai que dans le cas des régions tempérées les paramètres qui régissent ces modèles ont été calculés avec plus de précision, du fait de l'abondance des données disponibles, d'autres données de pluie restent nécessaires dans le cas des régions tropicales afin d'améliorer les deux variantes du modèle.

Dans un deuxième temps nous avons étudié le comportement des intensités de pluie des régions tropicales d'Afrique par rapport aux distributions décrivant les zones N et P du CCIR. Cette étude nous a permis de constater que les distributions des intensités de pluie qui caractérisent les localités côtières ne peuvent être bien représentées ni par la zone P ni par la zone N du CCIR, montrant ainsi l'insuffisance de cette classification en zones hydrométéorologiques.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que sur la côte les pluies sont stratiformes, tandis que les distributions décrivant les zones N et P correspondent mieux aux pluies convectives que l'on rencontre surtout à l'intérieur du pays.

Nous avons enfin dans un troisième temps étudié l'influence des grosses gouttes de pluie dans les régions tropicales. Après avoir donné une relation empirique qui décrit très bien la vitesse de chute des gouttes de pluie, nous avons montré que du fait de l'importance du nombre de moyennes et petites gouttes par rapport à celui des grosses gouttes dans une intensité de pluie donnée, ce sont les premières qui influent le plus sur l'intensité de pluie mesurée au sol, c'est-à-dire sur la quantité d'eau mesurée.

Pour ce qui est des grosses gouttes, au delà d'une certaine taille, elles n'agissent presque plus et l'on note une saturation de l'intensité calculée. Donc, en intégrant jusqu'à l'infini (par rapport à la dimension des gouttes) on prend en compte tout le spectre de gouttes de pluie et on ne commet pas d'erreurs.

CHAPITRE C

EFFETS DES PRECIPITATIONS SUR LES SYSTEMES RADIOELECTRIQUES A ONDES CENTIMETRIQUES ET MILLIMETRIQUES

I INTRODUCTION

La théorie de la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu aléatoire contenant des particules a fait l'objet de nombreux travaux [Ishimaru, 1977], et une des applications les plus importantes concerne l'étude du comportement des ondes hertziennes à travers une zone pluvieuse.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, l'ère des systèmes radioélectriques terrestres et obliques utilisant seulement des fréquences dans la bande 1 à 10 GHz est désormais révolue. La tendance est à l'utilisation des systèmes à large bande permettant d'écouler un maximum d'informations ; c'est-à-dire des systèmes fonctionnant à des fréquences supérieures à 10 GHz. Les bandes de fréquences 11-18 GHz sont maintenant utilisées à la fois pour des liaisons terrestres et pour des liaisons par satellite, et on trouve déjà des liaisons terrestres opérationnelles (sur des courtes distances) utilisant des fréquences supérieures à 35 GHz.

Cependant, les problèmes posés par l'interaction entre les gouttes de pluie et les ondes radioélectriques (affaiblissement, dépolarisation dans le cas de la réutilisation de fréquence pour augmenter la capacité des canaux, etc...) constituent un handicap à l'utilisation de ces fréquences car ils limitent les performances des systèmes. L'explication de ces phénomènes est donnée par la théorie classique de la diffusion de Mie.

Après avoir rappelé les résultats essentiels liés à cette théorie [Annexe 10] nous consacrons ce chapitre à l'étude de l'affaiblissement dû à la pluie. On y étudie la dépendance de l'affaiblissement vis à vis des paramètres suivants : la taille des gouttes de pluie, la température de l'eau, l'angle d'incidence de l'onde avec la goutte lors de leur interaction, la fréquence. Les détails des méthodes de prévision proposés ici sont donnés en annexe (articles [8], [9]).

II INFLUENCE DE LA PLUIE SUR LA PROPAGATION DES ONDES HERTZIENNES

Quand une onde radioélectrique traverse une zone pluvieuse, son énergie peut être affaiblie par les gouttes de pluie présentes dans la première zone de Fresnel. Cet affaiblissement dont l'importance dépend de la fréquence de l'onde, des propriétés microphysiques des gouttes de pluie (dimension, forme géométrique...), de la température de l'eau de pluie, résulte de la conjonction de deux phénomènes liés aux propriétés de l'eau: le phénomène d'absorption et le phénomène de diffusion.

II-1 Phénomène d'absorption

L'absorption se traduit par une perte d'énergie du signal émis au profit des gouttes de pluie que l'on peut considérer comme un diélectrique dissipatif qui absorbe l'énergie et la dissipe sous forme de chaleur.

II-2 Phénomène de diffusion

L'étude de la diffusion des ondes par des particules de pluie a été faite de façon approfondie par Van de Hulst [1957] sur la base de trois hypothèses :

- 1) L'onde diffusée a la même longueur d'onde que l'onde incidente
- 2) Les gouttes de pluie sont éloignées les unes des autres d'une distance supposée très grande en comparaison à la longueur d'onde
- 3) On néglige les effets dus à la diffusion multiple.

Cette étude se fait en deux étapes. La première concerne la diffusion par une seule goutte, la seconde la diffusion par un ensemble de gouttes dont on connaît la loi de distribution.

II-2-a Etude de la diffusion par une goutte de pluie

L'interaction entre une onde et une particule de pluie peut être schématisée par la figure 21. La goutte de pluie présentant un axe de symétrie ZZ' , le champ incident E_i est parallèle en polarisation verticale au plan contenant l'axe de symétrie des gouttes et la direction de propagation de l'onde incidente, tandis qu'en polarisation horizontale il est perpendiculaire à ce plan. L'axe de propagation est perpendiculaire à OY et fait avec l'axe OZ de symétrie de la goutte, un angle α .

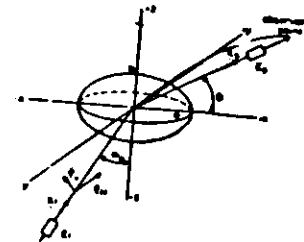


Fig.21: Géométrie de la diffusion par une goutte de pluie sphéroïdale

L'onde incidente induit des mouvements de charge dans la goutte, lesquels d'une part entraînent une dissipation d'une partie de l'énergie par effet joule à l'intérieur, et un rayonnement d'une autre partie de cette énergie à l'extérieur de la goutte.

k_0 étant le nombre d'onde dans le vide, k_i et e_i respectivement les vecteurs unitaires décrivant la direction de la propagation et la direction de la polarisation ; le champ incident s'écrit :

$$(29) \quad E_i(r) = E_0 \vec{e}_i \exp(jk_0 \vec{k}_i \cdot \vec{r})$$

On voit sur la figure 21 que :

$$(30) \quad \vec{k}_i \cdot \vec{r} = x \sin \alpha + z \cos \alpha$$

Soient x , y et z les vecteurs unitaires des axes OX , OY , OZ , les champs électriques incidents ont pour expressions :

$$(31) \quad E_{inc,v} = E_v (x \cos \alpha - y \sin \alpha) e^{j k_0 (x \sin \alpha + z \cos \alpha)}$$

en polarisation verticale et

$$(32) \quad E_{inc,H} = y E_H e^{j k_0 (x \sin \alpha + z \cos \alpha)}$$

en polarisation horizontale.

Les champs magnétiques correspondant peuvent s'écrire :

$$(33) \quad H_{inc,V} = \frac{k_0}{\omega \mu_0} E_{inc}$$

$$(34) \quad H_{inc,H} = - \frac{k_0}{\omega \mu_0} E_{inc,V}$$

La détermination du champ à l'intérieur et à l'extérieur de la goutte de pluie se ramène à la résolution des deux équations principales de Maxwell

$$(35) \quad \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$(36) \quad \nabla \times H = J + \frac{\partial H}{\partial t}$$

Ce problème n'a pas de solution analytique mais a été résolu par différentes techniques dont la méthode des intégrales de Fredholm [Holt et al., 1978] ; la méthode des perturbations, [Morrisson et Cross, 1974], etc.

Le champ diffusé par la goutte de pluie et observé en un point lointain distant de r est donné par la relation :

$$(37) \quad E_{d,V,H} = S_{V,H}(\theta, \alpha, a) \frac{e^{-j k r}}{j k r}$$

où $S_{V,H}(\theta, \alpha, a)$ représente l'amplitude de diffusion relative à la polarisation verticale (V) ou horizontale (H).

$\theta = 0^\circ$ correspond à la diffusion vers l'avant,

$\theta = \pi$ correspond à la diffusion vers l'arrière.

Nous ne nous intéressons ici qu'à la diffusion vers l'avant, la diffusion vers l'arrière ne concernant que les radars.

α représente l'angle d'incidence, et "a" le rayon équivalent de la goutte de pluie de forme sphéroïdale aplatie. Celui-ci se définit comme étant le rayon d'une goutte de pluie sphérique contenant le même volume d'eau que la goutte sphéroïdale aplatie.

Utilisant la technique donnée par Morrisson et Cross pour calculer l'amplitude de diffusion, on montre que :

$$(38) \quad S_V(0, \alpha, a) = \frac{1}{E_V} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n \geq m} (-j)^{n-1} \left(a_{V,mn} \frac{m}{\sin \alpha} P_n^{(m)}(\cos \alpha) + b_{V,mn} \frac{dP_n^{(m)}(\cos \alpha)}{d\alpha} \right)$$

$$(39) \quad S_H(0, \alpha, a) = \frac{1}{E_H} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n \geq m} (-j)^{n+2} \left(b_{H,mn} \frac{m}{\sin \alpha} P_n^{(m)}(\cos \alpha) + a_{H,mn} \frac{dP_n^{(m)}(\cos \alpha)}{d\alpha} \right)$$

Les principaux paramètres qui interviennent dans le calcul de la diffusion sont la géométrie de la goutte et l'indice de réfraction auquel sont liées les propriétés diélectriques de l'eau.

Les travaux de Ray [article 7] entrepris à partir des mesures faites auparavant par de nombreux chercheurs : Lane, Saxton, Cook, ... pour de nombreuses fréquences et à des températures variées, lui ont permis d'établir un modèle empirique qui permet de calculer l'indice de réfraction de l'eau "m" en fonction de la fréquence de l'onde et de la température.

t étant la température de l'eau en degrés celsius et λ la longueur de l'onde incidente dans le vide, ce modèle est décrit par la formule :

$$(40) \quad m = n_t - j n_i = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

avec n_t et n_i donnés par :

$$(41 a) \quad n_t = n_\infty + \frac{(n_s - n_\infty) [1 + (\lambda_s/\lambda)^{1-\eta} \sin(\eta\pi/2)]}{1 + 2 (\lambda_s/\lambda)^{1-\eta} \sin(\eta\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\eta)}}$$

$$(41b) \quad n_i = \frac{(n_s - n_\infty) (\lambda_s/\lambda)^{1-\eta} \sin(\eta\pi/2)}{1 + 2 (\lambda_s/\lambda)^{1-\eta} \sin(\eta\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\eta)}} + \frac{\tau \lambda}{18,8496 \cdot 10^{10}}$$

$$(42a) \quad n_s = 78,54 \cdot [1 - 4,597 \cdot 10^{-3} (t - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5} (t - 25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8} (t - 25)^3]$$

$$\text{avec} \quad \tau = 12,5664 \cdot 10^8$$

$$(42b) \quad n_\infty = 5,27137 + 0,0216474 t - 0,00131198 t^2$$

$$(42c) \quad \eta = -16,8129 / (t + 273) + 0,0609265$$

$$(42d) \quad \lambda_s = 0,00033836 \exp [2513,98 / (t + 273)]$$

C'est cet indice représenté par un nombre complexe qui explique les propriétés d'absorption et de diffusion de la goutte d'eau.

Définies comme étant le rapport de l'énergie diffusée, respectivement de l'énergie totale perdue à l'énergie de l'onde incidente, la section efficace de diffusion Q_d et la section efficace totale Q_t qui caractérise la réduction de l'intensité de l'onde incidente sont données par :

$$(43) \quad Q_d = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

$$(44) \quad Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} (2n+1) R_n(a_n + b_n)$$

$$\text{avec} \quad Q_t = Q_{abs} + Q_d$$

où Q_{abs} est la section efficace d'absorption. a_n et b_n sont les coefficients de Mie donnés par les relations :

$$(45) \quad a_n = \frac{\psi_n(x)\psi_n'(\beta) - m\psi_n(\beta)\psi_n'(x)}{\zeta_n(x)\psi_n'(\beta) - m\psi_n(\beta)\zeta_n'(x)}$$

$$(46) \quad b_n = \frac{m\psi_n(x)\psi_n'(\beta) - \psi_n(\beta)\psi_n'(x)}{m\zeta_n(x)\psi_n'(\beta) - \psi_n(\beta)\zeta_n'(x)}$$

$$\text{avec} \quad x = k_0 a = 2\pi a / \lambda \quad \beta = m x$$

ψ_n et ζ_n étant respectivement une fonction sphérique de Hankel et une fonction de Bessel d'ordre n .

L'amplitude de diffusion (dans le cas de la diffusion vers l'avant : $\theta = 0^\circ$) est liée à la section efficace de diffusion par la relation suivante qui est indépendante de la forme de la particule :

$$(47) \quad Q_t = \frac{\lambda^2}{\pi} R_n[S(0, \alpha, a)]$$

Pour des gouttes de pluie de très petites dimensions, comparées à la longueur d'onde du champ incident, c'est-à-dire $2\pi a/\lambda \ll 1$, on utilise l'approximation de Rayleigh. Les paramètres x et β étant petits, le développement des expressions de a_n et b_n dans les relations (45) et (46) décrites par les fonctions de Bessel-Ricatti permet alors d'approximer les sections efficaces de diffusion et d'absorption par :

$$(48) \quad Q_d = \frac{2}{3} \frac{\lambda^2}{\pi} x^2 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

$$(49) \quad Q_{abs} = \text{Im} \left[-\frac{\lambda^2}{\pi} x^3 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right]$$

II-2-b Diffusion par un ensemble de gouttes et affaiblissement linéique dû à la pluie

L'onde hertzienne devant traverser toute la zone pluvieuse, l'onde diffusée par la première goutte entre en interaction avec la prochaine goutte située sur l'axe de propagation, et ainsi de suite. Rappelons que nous négligeons les effets dus à la diffusion multiple.

$N(a, R) da$ exprimant la distribution des gouttes de pluie de rayon compris dans l'intervalle $[a, a+da]$, on peut à partir de la diffusion par une seule goutte, calculer la diffusion par toutes les gouttes supposées alignées sur le trajet de propagation en intégrant sur toute la distribution.

L'affaiblissement linéique (au kilomètre) dû à la pluie est alors donné par la relation :

$$(50) \quad a_{H,V} \text{ (dB/km)} = 4,343 \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} Q_t(a, \lambda) N(a, R) da$$

III DEPENDANCE DE L'AFFAIBLISSEMENT LINEIQUE VIS A VIS DE DIVERS PARAMETRES

L'affaiblissement linéique dû à la pluie dépend d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels la température de l'eau de pluie, la dimension des gouttes de pluie, l'angle d'incidence de l'onde sur les gouttes et la fréquence de l'onde porteuse. Nous allons examiner successivement dans la suite l'importance de ces divers facteurs.

III-1 Influence de la dimension maximale des gouttes de pluie

Utilisant la relation (50), en considérant la loi de distribution de gouttes de Marshall-Palmer puis la nôtre [Article 7], nous avons calculé pour des gouttes ayant un rayon maximum $a_{\max}$ respectivement égal à 3,5 mm, 5 mm, et 8 mm, l'affaiblissement linéique dû à des fortes intensités de pluie sur une liaison à 14,2 GHz en polarisation horizontale et verticale.

Comme on peut le remarquer sur les figures 22 à 25 qui représentent ces résultats, quelle que soit la polarisation et quel que soit le spectre de gouttes utilisé, les affaiblissements linéiques calculés pour $a_{\max}$ valant 5 mm et 8 mm coïncident. Donc l'affaiblissement linéique sature dès la prise en compte d'une certaine valeur maximale (du rayon des gouttes) au plus égale à 5 mm. Cela est sans doute dû au petit nombre de gouttes de taille supérieure à 5 mm. On note cependant un écart entre l'affaiblissement obtenu pour $a_{\max}$ valant 3,5 mm et respectivement 5 mm. Cet écart qui peut atteindre 1 à 3 dB pour une intensité de pluie de 200 mm/h avec la loi de distribution de gouttes que nous proposons, est néanmoins moins important avec la distribution de Marshall-Palmer.

Ceci peut s'expliquer par le fait que la distribution de gouttes de Marshall-Palmer est mieux adaptée aux pluies stratiformes, alors que la nôtre convient plus pour des pluies convectives tropicales comportant un nombre important de grosses gouttes. Si l'on analyse la figure 5 [Article 7] représentant l'affaiblissement linéique dû à une intensité de pluie de 100 mm/h sur une liaison à 20 GHz en fonction du rayon des gouttes, on remarque que ce sont en réalité les gouttes de pluie ayant un rayon compris entre 1 mm et 2 mm qui contribuent le plus à l'affaiblissement quel que soit l'angle d'inclinaison de la liaison. Malgré la présence de très grosses gouttes de pluie que l'on trouve dans les zones tropicales, leur faible densité entraîne que leur contribution à l'affaiblissement devient négligeable par rapport à l'affaiblissement provoqué par les moyennes et petites gouttes qui sont les plus nombreuses quelle que soit la distribution des gouttes d'autres dimensions. On remarque aussi sur cette figure 5 de l'article 7 que l'apport en affaiblissement de plus

petites gouttes de pluie est négligeable cette fois-ci du fait du peu d'effet individuel, et malgré leur densité élevée.

Les forts affaiblissements que l'on note sur des liaisons aux fréquences élevées sont donc dus aux petites et moyennes gouttes d'une part du fait de leurs amplitudes de diffusion (qui croissent de façon plus ou moins significative selon la fréquence avec le rayon des gouttes dans l'intervalle 0,5 mm à 2 mm et décroissent au-delà) d'autre part parce qu'elles sont beaucoup plus nombreuses que les grosses gouttes. Ces dernières n'influencent en fait que des ondes de fréquences en-dessous de 20 GHz [Article 7].

Toutes ces remarques permettent de conclure qu'on ne commet pas d'erreur significative dans la relation (50) en prenant une dimension maximale pratiquement infinie et une dimension minimale nulle. L'affaiblissement linéique peut alors se calculer par la relation

$$(51) \quad a_{H,V} \text{ (dB/km)} = 4,343 \int_0^{+\infty} Q_i(a, \lambda) N(a, R) da$$

Battam [1959] puis Olsen et Rogers [1979] ont montré que l'expression ci-dessus peut être remplacée par la relation empirique plus simple :

$$(52) \quad a_{H,V} = k_{H,V} R^{\alpha_{H,V}}$$

où les paramètres k et α que l'on calcule par régression dépendent de la fréquence de la liaison, de la polarisation, de la température de l'eau de pluie et de la loi de distribution de gouttes.

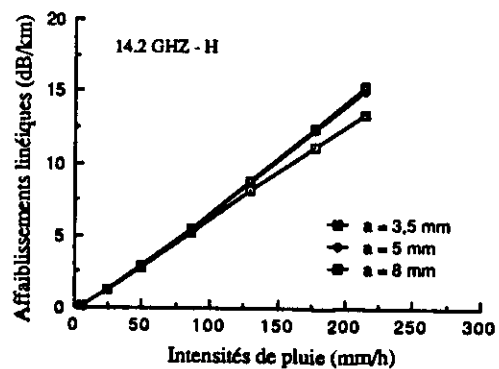


Fig. 22: variations de l'affaiblissement linéique en fonction de la dimension des gouttes (Notre distribution des gouttes pour les régions tropicales)

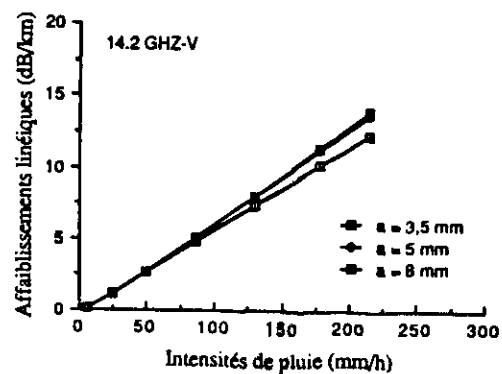


Fig. 23: variations de l'affaiblissement linéique en fonction de la dimension des gouttes (Notre distribution des gouttes pour les régions tropicales)

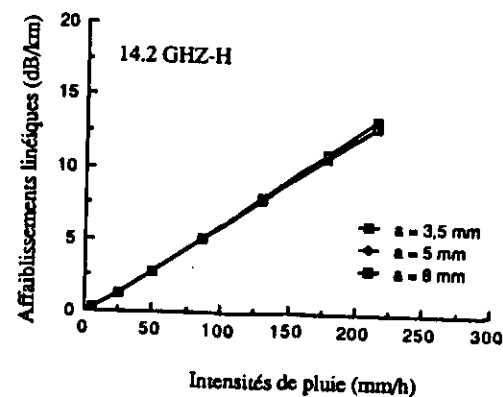


Fig. 24: Variations de l'affaiblissement linéique en fonction de la dimension des gouttes (distribution des gouttes de Marshall - Palmer)

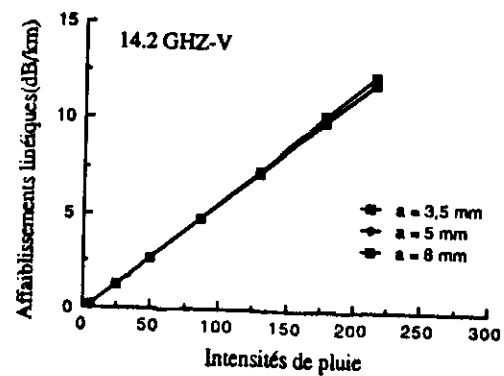


Fig. 25: Variations de l'affaiblissement linéique en fonction de la dimension des gouttes distribution des gouttes de Marshall - Palmer

III-2 Influence de la température de l'eau de pluie

Comme on le voit dans les équations (41 à 42) données par Ray, la dépendance en température de l'affaiblissement dû à la pluie résulte de ce que l'indice de réfraction de l'eau dépend de la température de l'eau de pluie. Une analyse des figures 26 et 27 montre que l'affaiblissement dû à la pluie augmente avec la température de l'eau pour des fréquences inférieures à environ 20 GHz, et que ce comportement s'inverse aux fréquences supérieures (bien que l'échelle de représentation graphique choisie ici ne le fasse pas bien ressortir). Ces résultats permettent de penser que les pluies tropicales étant plus tièdes que les pluies tempérées [Beard, 1986] on obtiendrait des affaiblissements plus élevés (en-dessous de 20 GHz) en zone tropicale qu'en zone tempérée. De plus, la température de l'eau de pluie étant plus élevée au niveau du sol que plus haut, c'est en définitive au niveau de la station terrienne que l'on enregistrerait les affaiblissements les plus forts quand la pluie couvre une zone contenant celle-ci.

III-3 Influence de l'angle d'incidence de l'onde

L'angle d'incidence α de l'onde avec l'axe de symétrie de la goutte est assimilé à l'angle d'élévation du repeteur (relais) de la liaison radioélectrique. Il est égal à 90° pour une liaison terrestre en visibilité directe, tandis que pour des liaisons par satellite il décroît et, est voisin de zéro dans les régions équatoriales. L'analyse des figures 27 et 28 montre qu'en polarisation verticale, l'affaiblissement croît avec l'angle d'élévation (Fig. 28) alors qu'en polarisation horizontale il décroît quand cet angle croît (Fig. 27). Dans le cas des gouttes sphériques l'affaiblissement ne dépend plus de l'angle d'incidence.

III-4 Influence de la fréquence

Pour des fréquences (10 à 30 GHz) considérées sur les figures 26, on note que quels que soient la température de l'eau de pluie, et le spectre de gouttes, l'affaiblissement dû à la pluie croît avec la fréquence. Cet accroissement est d'autant plus fort que l'intensité de pluie $R(\text{mm/h})$ est élevée.

Pour des gouttes de pluie sphériques, cet affaiblissement linéique croît rapidement pour toutes les intensités de pluie jusqu'à une fréquence d'environ 100 GHz. Au dessus de ce seuil et particulièrement à partir de 200 GHz, l'affaiblissement a tendance à décroître quand la fréquence augmente, cette tendance étant moins forte pour des faibles intensités de pluie [Rogers et Olsen 1976]

Ce comportement s'explique par celui du rapport a/λ [Article 7] liant la longueur d'onde λ de la liaison à la dimension de la goutte de pluie (en l'occurrence le rayon a).

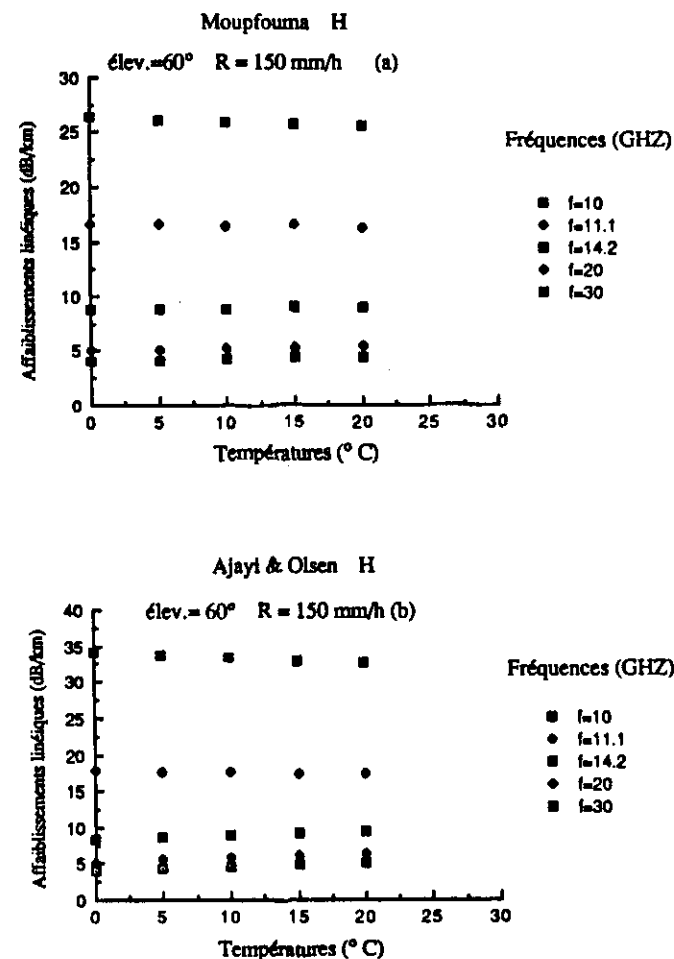


Fig. 26: (a,b): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différentes fréquences

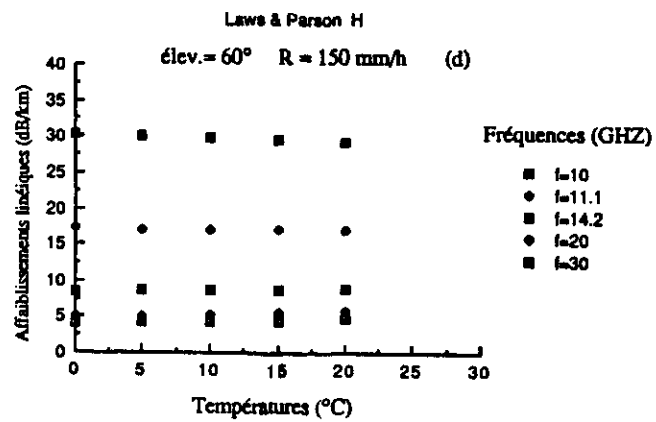
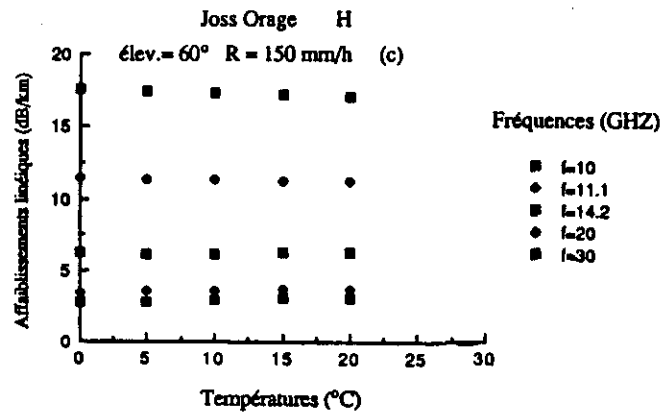


Fig. 26(c, d): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différentes fréquences

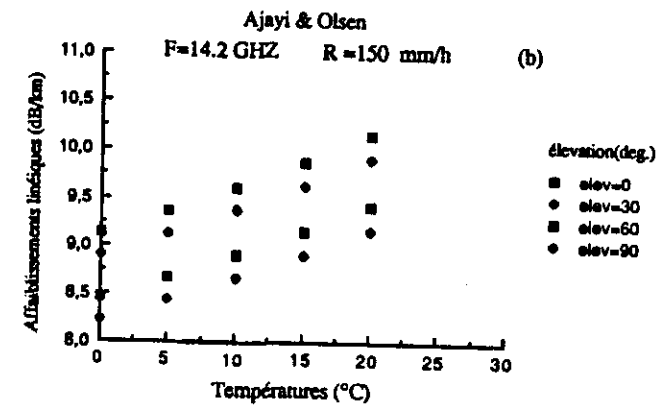
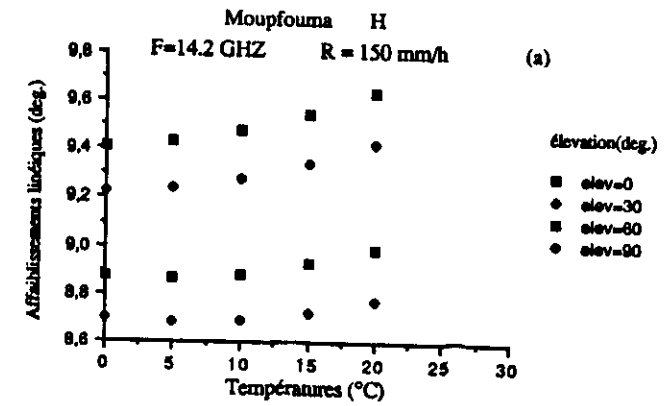


Fig.27(a,b): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différents angles d'élévation

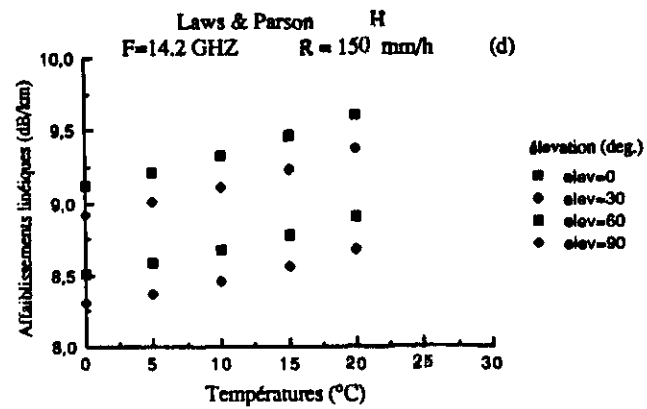
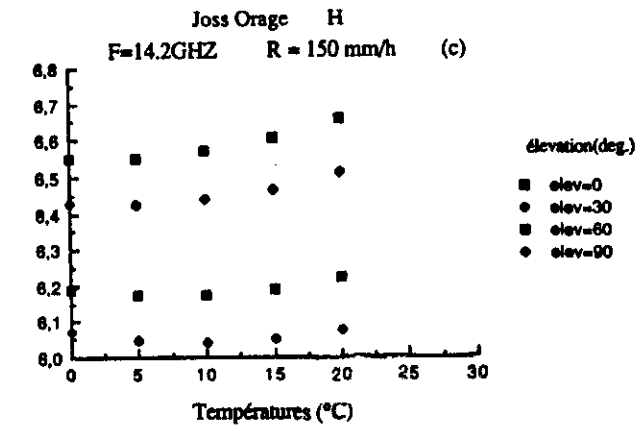


Fig 27(c,d): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différents angles d'élévation

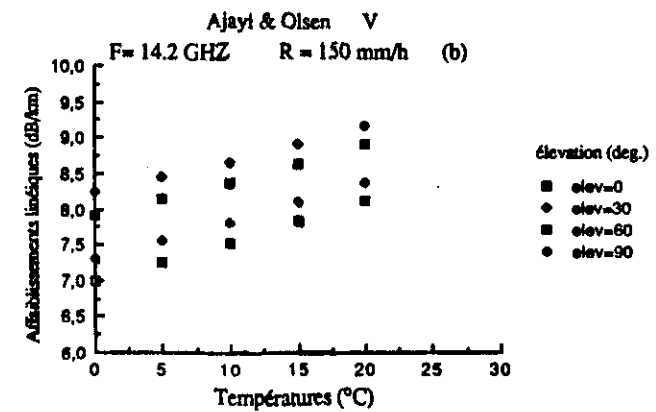
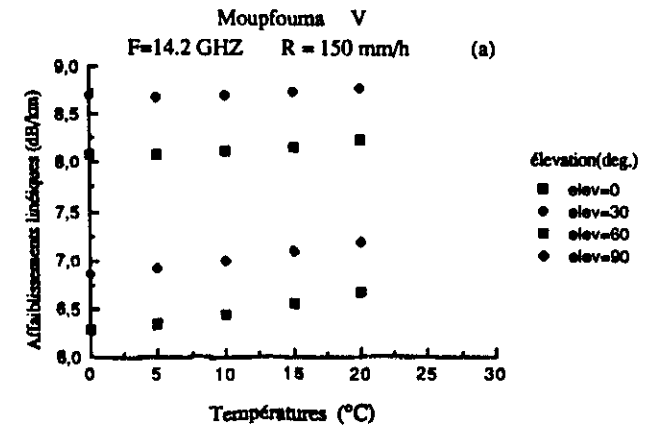


Fig 28(a,b): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différents angles d'élévation

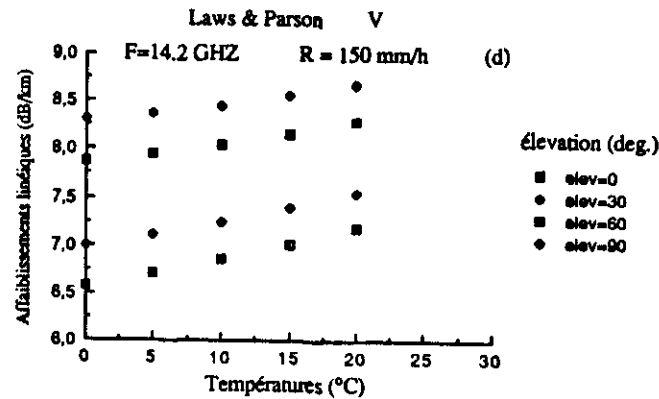
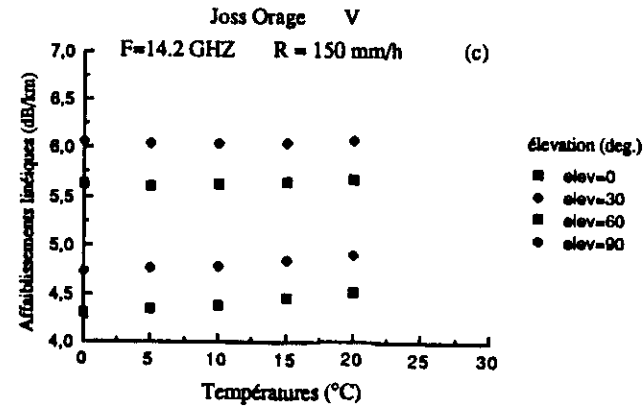


Fig.28(c,d): Affaiblissements linéiques calculés pour différents spectres de gouttes et différents angles d'élévation

IV AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE SUR UN TRAJET TERRESTRE EN VISIBILITE DE LONGUEUR SUPERIEURE A 1 KM

L'importance de l'affaiblissement dû à la pluie sur un trajet radioélectrique d'une certaine longueur est lié à la quantité de pluie rencontrée par l'onde au cours de sa propagation. Comme cela a été dit plus haut, les effets de la pluie dépendent de sa structure verticale et horizontale. Pour des liaisons terrestres, on suppose que la pluie a une structure verticale uniforme.

IV-1 Influence de la structure horizontale

Les nombreuses cellules qui constituent la pluie ne donnent pas à celle-ci une répartition uniforme dans le sens horizontal. Aussi, sa distribution spatiale constitue-t-elle une notion difficile à appréhender et à quantifier dans le calcul des affaiblissements. La notion de longueur équivalente que nous introduisons ci-dessous et la notion d'intensité (de pluie) moyenne tiennent compte de ce fait.

IV-2 Notion de longueur équivalente du trajet radioélectrique Leq

La longueur équivalente est un paramètre très utile pour l'approche du problème des prévisions des affaiblissements dus à la pluie. Son utilisation permet de supposer que la pluie est uniforme le long du nouveau trajet, et qu'il suffit alors d'intégrer l'affaiblissement linéique sur ce trajet pour évaluer l'affaiblissement total dû à la pluie tel que :

$$(53 a) \quad A_{H,V} \text{ (dB)} \approx \int_0^{Leq} 4,343 \int_0^{+\infty} Q_t(a, \lambda) N(a, R) da dx$$

$$(53 b) \quad A_{H,V} \text{ (dB)} = \left(4,343 \int_0^{+\infty} Q_t(a, \lambda) N(a, R) da \right) Leq = k_{H,V} R^{\alpha_{H,V}} Leq$$

Cette longueur équivalente Leq est liée à la longueur réelle l (km) du trajet terrestre par un coefficient de proportionnalité C tel que :

$$(54) \quad Leq \text{ (km)} \approx C l$$

"C" est défini à partir de la relation (55) par une expression empirique ou semi-empirique, car celle-ci est développée à partir des seules statistiques expérimentales. Cette expression prend en compte un certain nombre de paramètres qui ne sont pas les mêmes pour tous les auteurs [Articles 8, 9].

$$(55) \quad C = \frac{A_{H,V}}{k_{H,V} R^{\alpha_{H,V}} l}$$

Utilisant des données statistiques d'affaiblissements à long terme collectées sur 40 liaisons hertziennes pour des fréquences comprises entre 7 et 40 GHz et des longueurs de trajet allant de 1 à 60 km nous avons proposé pour C (noté r_e dans l'article [8]) la relation suivante [Article 8] :

$$(56-a) \quad r_e = \frac{1}{1 + 0,03 \left(\frac{P}{0,01} \right)^{-\beta} l^m}$$

avec:

$$(56-b) \quad m(f,l) = 1 + 1,4 \times 10^{-4} f^{1,76} \log_e(l)$$

où l (km) représente la longueur réelle du bond hertzien, f (GHz) la fréquence et P (%) le pourcentage de temps pour lequel on veut prévoir l'affaiblissement. Les valeurs du paramètre β qui dépend de la longueur du trajet radioélectrique sont données dans l'Article 8 en annexe.

Cependant, compte tenu du fait que la longueur maximum du bond hertzien dépend entre autre de la distribution des intensités de pluie dans la localité où sera installé le système, nous avons par la suite jugé nécessaire de proposer une nouvelle relation pour le coefficient C telle que [Article 9].

$$(57) \quad C(l, f, R, P) = u(P) \frac{\left(\frac{R_{0,01}}{R(P)} \right)^{0,38 + 0,25}}{1 + \eta \left(\frac{P}{0,01} \right)^{-0,36} l^{m(f,l)}}$$

où $R_{0,01}$ (mm/h) et $R(P)$ représentent les intensités de pluie mesurées sur le trajet radioélectrique pendant respectivement 0,01 % et P (%) du temps, P étant le pourcentage du temps pour lequel on calcule l'affaiblissement dépassé.

Le paramètre "m" est défini par la relation (56-b), tandis que les expressions de "η" et de "u(p)" pour les liaisons obliques et terrestres sont données dans l'Article 9 en annexe.

La dépendance en fréquence de C dans l'expression de "m" résulte à la fois de la non uniformité de la pluie le long du trajet radioélectrique et de la non linéarité entre l'affaiblissement linéique et l'intensité de pluie.

L'expression de C donnée par la relation (56-a) est valide quelque soit le pourcentage de temps P (%) inférieur à l'unité, rendant ainsi la longueur équivalente du trajet de propagation toujours plus petite que la longueur réelle. C peut donc être considéré sous cette forme comme étant un coefficient de réduction.

L'analyse des valeurs de C données par la relation (57) montre par contre que si pour des très fortes intensités de pluie, c'est-à-dire pour des pourcentages de temps inférieurs à 0,01, C prend des valeurs inférieures à l'unité, pour des pourcentages de temps supérieurs ou égaux à 0,01, c'est-à-dire pour des faibles et moyennes intensités de pluie il prend des valeurs supérieures à l'unité, et par voie de conséquence la longueur équivalente du trajet radioélectrique affectée par la pluie devient supérieure à la longueur réelle de la liaison.

Ces deux situations nous semblent en accord avec la structure de la pluie décrite dans le Chapitre B, à savoir que les pluies stratiformes sont très étendues et peuvent couvrir des distances au-delà d'un trajet hertzien, tandis que les pluies convectives couvrent des surfaces très restreintes. Ceci nous a amené à préférer pour C le terme de coefficient de correction à celui de coefficient de réduction [Article 9].

V AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE SUR UN TRAJET TERRE-ESPACE

Les prévisions des affaiblissements sur des trajets obliques à des fréquences inférieures à 60 GHz prennent en compte d'une part l'influence de la structure horizontale des précipitations, d'autre part l'influence de la région terre-espace où l'eau est liquide, celle due à la neige et à la glace dans la région supérieure étant considérée comme négligeable (pour les fréquences considérées).

La longueur du trajet oblique depuis le sol jusqu'au niveau de l'isotherme 0°C est alors donnée par la relation :

$$L_s = \begin{cases} \frac{H_R - H_0}{\sin(\theta)} & \theta \geq 5^\circ \\ \frac{H_R - H_0}{(\sin^2(\theta) + 2 \frac{H_R - H_0}{8500})^{1/2} + \sin(\theta)} & \theta < 5^\circ \end{cases} \quad (58)$$

θ est l'angle d'élévation du satellite, H_0 (km) l'altitude de la station par rapport au niveau de la mer et H_R (km) la hauteur des précipitations donnée par la relation (7) dans le Chapitre B.

Le coefficient de correction qui donne à la pluie une structure uniforme sur le trajet de propagation oblique s'obtient à partir de la relation (57) adaptée aux liaisons terrestres où l'on remplace cette fois la longueur du trajet horizontal l (km) par celle du trajet oblique L_s (km). D'où [Article 9]

$$(59) \quad C(L_s, f, R, P) = u(P) \frac{\left(\frac{R_{0.01}}{R(P)}\right)^{0.38 \cdot L_s^{0.25}}}{1 + \eta \left(\frac{P}{0.01}\right)^{-0.36} L_s^m (f, L_s)}$$

VI METHODES DE PREVISION DES AFFAIBLISSEMENTS DUS A LA PLUIE

Lors de la planification dans une région donnée des systèmes terrestres ou par satellite fonctionnant à des fréquences élevées, il convient de prévoir les affaiblissements dus à la pluie. Pour cela il est nécessaire de disposer d'une méthode de prévision fiable dont la précision doit permettre aux systèmes de fonctionner avec une marge brute aussi faible que possible.

Depuis de nombreuses années, de nombreux travaux ont été consacrés à cet objectif et de nombreux modèles pour améliorer la prévision des affaiblissements sur des liaisons hertziennes ou par satellites ont été proposés [Misme-Fimbel (voir article 9)] ; Crane (1980) ; Fedi (1981) ; Boithias-Battesti (1982) ; Garcia Lopez-Peiro (1983)...]. Ces modèles n'ont pas tous cependant la même approche du problème ; certains sont basés sur le concept de cellule de pluie, d'autres sur celui de l'intensité moyenne équivalente sur le trajet radioélectrique, d'autres enfin sur le concept du trajet radioélectrique équivalent. Ceux que nous proposons dans les Articles [8] et [9] sont basés sur ce dernier concept que nous avons décrit dans les paragraphes IV et V et sont régis par les expressions du coefficient multiplicateur C données pour différents cas par les relations (56), (57) et (58).

VI-1 Liaisons terrestres

Utilisant les relations (53-c), (54) et (56) nous avons proposé (Article 8) un modèle de prévision des affaiblissements dus à la pluie sur des liaisons hertziennes en visibilité tel que :

$$(60) \quad A \text{ (dB)} = kR^a \frac{1}{1 + 0.03 \left(\frac{P}{0.01}\right)^{-b} l^m}$$

Testé par le groupe de travail intérimaire 5/2 du CCIR lors de sa réunion de Nice en 1985, ce modèle a été jugé de façon globale comme donnant des résultats plus satisfaisants que la méthode du CCIR comme on peut le voir du reste dans le tableau de comparaisons des statistiques d'erreurs [Article 8] entre les prévisions à partir de chacun des deux modèles et les affaiblissements mesurés sur une quarantaine de liaisons.

Le remplacement du coefficient de réduction décrit par la relation (56) par le coefficient de correction donné par la relation (57) a permis de modifier notre modèle de prévision des affaiblissements dus à la pluie tel que :

$$(61) \quad A \text{ (dB)} = kR^{\alpha} u(P) \frac{\left(\frac{R_{0,01}}{R(P)}\right)^{0,38+1 \cdot 0,25}}{1 + \eta \left(\frac{P}{0,01}\right)^{-0,36} I^{m(1,1)}}$$

et d'améliorer les résultats [Article 9] par rapport à notre modèle précédent et au modèle du CCIR.

VI-2 Liaisons par satellite

L'utilisation dans la relation (54) du coefficient de correction décrit par la relation (59) a permis d'adapter ce modèle aux liaisons par satellite [Article 9].

Les données d'affaiblissements dus à la pluie sur des liaisons par satellites sont de loin plus nombreuses que celles concernant les liaisons hertziennes terrestres, tant au niveau de la banque du CCIR que dans la littérature. De plus leur répartition dans les régions où elles sont disponibles : Europe, Japon, Amérique du Nord, Australie, permet d'entreprendre une étude individuelle pour chacune de ces régions.

Du fait de la différence de la structure de la pluie entre l'Europe et le Japon, ou entre l'Australie et les Etats-Unis, il nous est apparu qu'un modèle de prévision des affaiblissements pour les liaisons obliques avec un paramètre (le paramètre $u(p)$) adapté à chacune des régions ci-dessus donnerait une description plus fine de la distribution des affaiblissements dus à la pluie. C'est sur ce principe que repose le modèle adapté aux liaisons par satellite proposé dans l'Article [9].

Le cas de l'Australie (la partie tropicale) nous est apparu d'autant plus intéressant qu'il s'agit de la seule partie de la zone tropicale où l'on dispose des données. On peut donc penser que le modèle adapté à cette partie du globe pourrait être utilisé pour des études concernant d'autres régions tropicales en attendant de disposer d'autres données qui permettraient de l'améliorer.

Une telle adaptation du modèle par région n'est pas possible pour les liaisons hertziennes en visibilité pour lesquelles la banque de données du CCIR ne compte qu'une quarantaine de liaisons installées pour la plupart en Europe.

Ce modèle donne des résultats meilleurs que ceux donnés par le CCIR. Selon le modèle du CCIR qui n'est basé que sur l'intensité de pluie $R_{0,01}$ (mm/h) observée pendant 0,01% du temps, si dans deux localités quelconques équipées des mêmes systèmes radioélectriques on observe la même valeur de $R_{0,01}$ alors l'affaiblissement observé pour un pourcentage de temps donné est le même. Ceci est parfaitement faux comme nous le montrons et l'expliquons dans l'Article [9], on doit tenir compte aussi des conditions climatiques de chaque station.

VII APPLICATION

DETERMINATION DU CHAMP D'UN EMETTEUR RADIOELECTRIQUE

a) Les lois de distribution de gouttes mentionnées dans ce chapitre permettent de déterminer le champs reçu en temps de pluie par rapport à la puissance reçue en l'absence de pluie.

Supposons qu'il pleuve sur un trajet radioélectrique de longueur x le long duquel se propage une onde de densité de puissance P que l'on peut exprimer au moyen du vecteur de Poynting par la relation :

$$(62) \quad P = \frac{1}{2} R_e (E \times H^*)$$

où E , H représentent les champs électrique, et magnétique. L'affaiblissement par les gouttes de pluie sur une épaisseur de pluie dx le long du trajet radioélectrique est tel que :

$$(63) \quad \frac{dP}{dx} = -P \int_0^{+\infty} Q_i(a, \lambda) N(a, R) da$$

Si l'on utilise la relation (53-b) qui décrit l'affaiblissement $A(\text{dB})$ dû à la pluie sur tout le trajet de propagation, la solution de l'équation (63) est :

$$(64) \quad P(L_{eq}) = P(0) e^{-L_{eq} \int_0^{+\infty} Q_i(a, \lambda) N(a, R) da}$$

où $P(o)$ est la puissance à l'entrée de la zone de pluie, tandis que $P(Leq)$ représente la puissance absorbée par la pluie sur un trajet radioélectrique telle que la longueur équivalente soit Leq .

b) Etudions par exemple le cas d'une liaison par satellite à 11,1 GHz permettant la transmission des données, de la téléphonie et des émissions de télévision en milieu tropical. L'antenne de la station terrienne est d'une dizaine de mètres de diamètre telle qu'utilisée par INTELSAT (Standart C) ou par EUTELSAT. La puissance des amplificateurs de ce type de stations terriennes est de l'ordre de 500 à 2 300 Watts d'après les informations fournies par Alcatel Telspace.

Pour cette application nous prendrons comme paramètres de propagation (intensités de pluie, affaiblissements...) ceux de la station de Innisfail (Australie) que nous avons déjà utilisés dans l'Article [9] (et une puissance $P(o) = 1\,000\text{ W}$). Une comparaison des résultats schématisés par la figure 29, montre que les puissances calculées à partir des affaiblissements donnés par le modèle de gouttes que nous proposons coïncident pour la fréquence donnée avec les résultats donnés par la distribution de Marshall-Palmer et les données mesurées, alors que les résultats obtenus avec la distribution d'Ajayi-Olsen s'en écartent sensiblement.

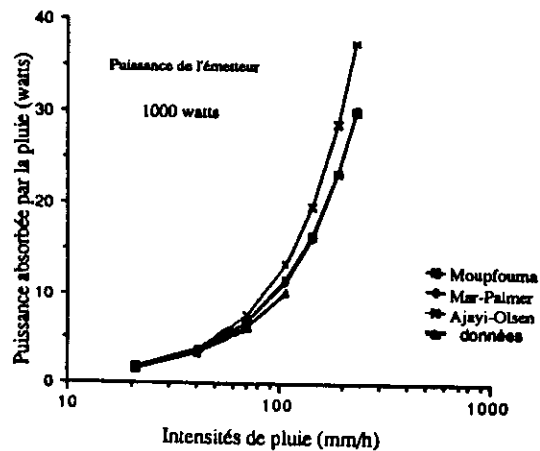


Fig. 29: Puissance absorbée calculée pour différents spectres de gouttes de pluie

VIII CONCLUSION DU CHAPITRE C

Dans ce chapitre nous avons d'abord étudié l'influence de très grosses gouttes sur les ondes centimétriques et millimétriques. Il nous est apparu que malgré la présence effective de ces gouttes dans les pluies tropicales, leur densité volumique étant trop faible par rapport à celle des gouttes de petites et moyennes tailles, ce sont ces dernières qui sont à l'origine des forts affaiblissements observés sur les liaisons à fréquences élevées particulièrement pour des fréquences supérieures ou égale à 20 GHz. La contribution des grosses gouttes n'est sensible que pour des fréquences inférieures à ce seuil.

Nous avons ensuite proposé deux modèles de prévision des affaiblissements par la pluie pour des liaisons hertziennes en visibilité ou pour des liaisons par satellite. Dans ce dernier cas, l'un des paramètres du modèle a permis de l'affiner en l'adaptant à différentes régions pour lesquelles le nombre de données était suffisant (Amérique du Nord, Japon, Europe, Australie). Ces modèles donnent des prévisions d'affaiblissements qui sont meilleures que celles du CCIR.

CHAPITRE D

CONCLUSION GENERALE

Le développement des systèmes de télécommunications à ondes centimétriques et millimétriques a accru l'importance de l'étude des précipitations, surtout dans les régions à très forte pluviométrie : les régions tropicales.

Pour planifier des liaisons terrestres ou par satellites à fréquences élevées, il faut prendre en compte les effets dus à la pluie qui constituent un handicap majeur pour la propagation des ondes hertziennes, à des fréquences supérieures à 10 GHz.

Malheureusement les données que l'on peut obtenir auprès des services météorologiques nationaux ne sont pas disponibles sous une forme utilisable par les ingénieurs en télécommunications pour rendre compte des effets de la pluie sur la propagation. C'est pour cela que les spécialistes en propagation entreprennent des campagnes de collecte de données et travaillent à l'élaboration de méthodes de prévision dont la fiabilité est en partie liée à celle des données.

La pluie est un phénomène très variable dans le temps et dans l'espace, et pour disposer de données fiables, il faut les recueillir sur une période très longue. L'association d'un radar à une batterie de pluviomètres constitue la solution idéale pour l'étude de la structure verticale et horizontale des précipitations, mais les données ainsi collectées sont entachées d'erreurs. En ce qui concerne les pluviomètres, c'est le relief du terrain et le vent qui sont les principales sources d'erreurs, tandis que pour le radar c'est surtout les erreurs dues au modèle mathématique (Z-R) liant la réflectivité radar à l'intensité de pluie.

Dans cette étude, l'analyse des données pluviométriques obtenus dans de nombreux sites de mesures représentatifs des zones tempérées et des zones tropicales nous a permis de montrer que : les intensités de pluie instantanées sont proportionnelles à l'inverse de la racine carrée de leurs pourcentages de temps de dépassement dans les régions tempérées, tandis que dans les régions tropicales elles sont proportionnelles à l'inverse de la racine cubique.

Afin de décrire la distribution des intensités de pluie, un certain nombre de méthodes de prévision ont été proposées, parmi lesquelles les plus connues sont la loi log-normal et la loi

gamma. Cependant ces deux modèles ne peuvent pas être utilisés de façon satisfaisante dans de nombreuses régions climatiques.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé un modèle semi-empirique qui permet de décrire la distribution cumulative des intensités de pluie dans toute la gamme des valeurs utiles. Ce modèle qui a un comportement asymptotique log-normal pour les faibles intensités de pluie et un comportement gamma pour les intensités de pluie plus fortes possède deux variantes qui dépendent chacune de trois paramètres dont un : $R_{0,01}$ (mm/h) est commun aux deux

$R_{0,01}$ qui représente l'intensité de pluie observée pendant 0,01 % du temps a été recommandée par le CCIR et répertorié sous forme de courbes d'égale intensité dans le rapport 563.

Les deux autres paramètres sont :

1) Pour la première variante : le couple de valeurs (λ, s) qui a été défini pour différentes zones climatiques du CCIR et qui permet de donner une assez bonne approximation de la distribution cumulative des intensités de pluie dans une localité donnée, pourvu que l'on connaisse la zone du CCIR dans laquelle appartient ladite localité, ainsi que la valeur de $R_{0,01}$ (mm/h). Cette première variante est plutôt recommandée pour les régions pour lesquelles on ne dispose pas de données de pluie.

2) Pour la deuxième variante : le couple de valeurs (u_1, u_2) qui a fait l'objet d'un atlas mondial que nous proposons et qui prend en compte la nature du terrain (présence de masses d'eau, montagnes...) et donc les micro-climats. Cette deuxième variante donne dans la plupart des cas une meilleure description de la distribution cumulative des intensités de pluie que la première.

L'analyse des données tirées de 162 sites de mesures répartis à travers tous les continents nous a permis de constater que les localités riveraines de grandes étendues d'eau ou situées dans un relief accidenté sont soumises à des pluies stratiformes avec des pentes de distribution moins abruptes, alors que les pluies convectives sont beaucoup plus fréquentes à l'intérieur du continent et sont caractérisées par des pentes plus fortes, c'est-à-dire par des valeurs de (u_1, u_2) plus faibles que dans le cas des pluies stratiformes.

L'étude des données de Douala a montré que les distributions des intensités de pluies qui caractérisent les localités côtières des régions tropicales d'Afrique ne peuvent pas être bien représentées par les zones N et P du CCIR. La classification du monde en zone climatique paraît donc insuffisante.

Du point de vue théorique, on sait que les effets de la pluie sur les ondes hertziennes sont la conjonction de deux phénomènes : l'absorption et la diffusion qui sont liées aux propriétés de l'eau. Leur importance n'est pas la même selon le régime pluviométrique.

Malgré l'importance de l'effet individuel des gouttes de pluie de grande dimension qui caractérisent les régions tropicales, leur faible densité ne leur confère qu'une contribution négligeable à l'affaiblissement par rapport à l'affaiblissement provoqué par les autres gouttes qui sont les plus nombreuses. L'effet est particulièrement marqué pour les fréquences supérieures à 20 GHz. L'affaiblissement dû à la pluie augmente avec la température de l'eau pour des fréquences inférieures à 20 GHz et ce comportement s'inverse pour des fréquences au-dessus de 20 GHz. Les pluies tropicales étant plus tièdes que les pluies tempérées, on peut donc penser que pour des fréquences inférieures ou égales à 20 GHz, on a des affaiblissements plus élevés en région tropicale qu'en région tempérées. D'autre part, la température de l'eau étant plus élevée au niveau du sol qu'à haute altitude, c'est donc la zone située au niveau de la station terrestre qui provoque les affaiblissements les plus importants pour des liaisons par satellite.

Pour ce type de liaisons, en polarisation linéaire la polarisation verticale semble la mieux appropriée, particulièrement dans les zones équatoriales où l'angle d'élévation du satellite peut approcher zéro degré.

Pour la prévision des affaiblissements dus à la pluie, il est nécessaire de disposer de méthodes fiables qui permettent aux systèmes de fonctionner avec une marge brute aussi faible que possible. Nous avons proposé dans le cadre de ce travail un modèle de prévision adapté aux liaisons terrestres et par satellite.

Ce modèle est caractérisé par un coefficient de correction qui selon le type de pluie (pluie convective ou stratiforme) réduit ou accroît la longueur équivalente du trajet radioélectrique sur lequel on suppose qu'il pleut uniformément.

Pour des liaisons par satellite, l'abondance des données de propagation disponibles dans différentes régions du globe, nous a permis d'adapter le modèle à l'Europe, au Japon, à l'Australie (partie tropicale) et à l'Amérique du Nord. Ces régions n'étant en effet pas soumises au même régime pluviométrique, nous avons adapté un des paramètres du modèle à chacune d'elles afin d'obtenir une meilleure description de la distribution des affaiblissements.

Les prévisions fournies par ces modèles sont en général meilleures que celles données par la méthode du CCIR.

BIBLIOGRAPHIE

- AMAYENC P., 1986 : Utilisation des Radars pour la mesure Quantitative des Précipitations. Note Technique CRPE 149.
- BARRET E.C. and D.W. MARTIN, 1981 : The use of satellite data in rainfall monitoring. Academic Press, UK.
- BEARD K.V. and *al.*, 1986 : Aircraft observations of large raindrops in warm, shallow convective clouds. Geographical Research Letters, October, Vol. 13, n° 10, pp. 991-994.
- BOITHIAS L., 1983 : Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Collection DUNOD CNET-ENST.
- CRANE R.K., 1980 : Prediction of attenuation by rain. IEEE Trans. Com. USA, 28, n° 9, pp. 1717-1733.
- FEDI F., 1979 : Attenuation due to rain on terrestrial path. Alta Frequenza Ital., 48, pp. 167-184.
- FEDI F., 1981 : Normalization procedures and prediction techniques for rain attenuation on terrestrial and earth space radio links. IEE Conf. Proc., n° 195.
- GARCIA L. and J. PEIRO, 1983 : Simple rain attenuation prediction technique for terrestrial radio links. Electron. Lett., 19, pp. 879-880.
- HIRSCH F. and L. ROMANELLI, 1984 : Generalizacion de una ley de distribucion empirica aplicable a problemas geofisicos. Geoacta, Vol. 12, n° 1, pp. 331-337.
- ISHIMARU A., 1977 : Theory and application of wave propagation and scattering in random media. Proc. of the IEEE, Vol. 65, pp. 1030-1061.
- KERR D.E., 1951 : Propagation of short radio waves. Vol. 13, MIT Radiation Laboratory Series. New York : McGraw-Hill, pp. 671-692.

- LAWS J.O. and D.A. PARSONS, 1943 : The relation of raindrop intensity. Trans. Amer. Geophys. Union. Vol. 24, pp. 452-460.
- LEMAITRE Y., 1981 : Etude thermodynamique et dynamique des lignes de grains tropicales observées à Korhogo (COPT 79), Thèse de 3ème Cycle.
- MORRISSON J. and M. CROSS, 1974 : Scattering of a plane electromagnetic wave by asymmetric raindrops. BSTJ, Vol. 53, pp. 955-1019.
- MOUPFOUMA F., 1982 : Etude de la propagation des ondes radioélectriques en climat équatorial et tropical, Thèse Doctorat d'Ingénieur Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- MOUPFOUMA F., & L. MARTIN, 1985 : L'acquisition de données de propagation et de radio météorologie par le canal du système de collecte par satellite "Argos". Note Technique LAB/MER/201.
- PRUPPACHER H.R., and R.L. PITTER, 1971: A semi empirical determination of the shape of clouds and raindrops. J. Atmos. Sc, 28, pp.86-94
- ROGERS D. V., and R.L. OLSEN, 1976: Calculation of Radiowave attenuation due to rain at frequencies up to 1000 GHz, CRC. Report n°1299 Communication Research Centre, Dpt. of Communication, Ottawa Canada.
- ROGERS, R., 1976 : Tutorial papers and reviews : IEEE Trans. on Ant. and Propag., July, pp. 547-567.
- VAN DE HULST, H., 1957 : Light scattering by small particles. New York : John WILEY, pp. 5-6 and pp. 28-36.

Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical

Fidèle MOUPFOUMA *

Analyses

L'auteur présente les résultats des mesures des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie effectuées au Congo à la fréquence de 7 GHz. Il propose une relation empirique permettant de calculer la distribution des intensités de pluie en zone équatoriale et tropicale qui est bien vérifiée par les données expérimentales, tant pour les faibles que pour les fortes intensités de pluie. Il utilise certaines des méthodes de prévision dont on dispose actuellement pour établir les statistiques des affaiblissements dus à la pluie, notamment celles de S. H. Lin, F. Fedi, R. Crane. Les affaiblissements calculés avec chacune de ces méthodes sont comparés aux valeurs expérimentales.

Mots clés : Propagation onde électromagnétique, Onde centimétrique, Affaiblissement, Pluie, Zone équatoriale, Afrique, Etude statistique, Loi empirique.

RAINFALL RATE STATISTICAL DISTRIBUTION AND INDUCED ATTENUATION IN EQUATORIAL AND TROPICAL CLIMATES

Abstract

Measurements of rainfall rates and of attenuations due to rain at 7 GHz have been carried out in Congo. An empirical relationship for the prediction of rainfall rates in equatorial and tropical climates has been derived, and reveals good agreement with experimental data. Some rain attenuation prediction models (S. H. Lin, F. Fedi, R. Crane) are checked with our experimental data.

Key words : Electromagnetic wave propagation, Centimetric wave, Attenuation, Rain, Equatorial zone, Africa, Statistical study, Empirical law.

Sommaire

1. Introduction.
2. Dispositif expérimental.
3. Modélisation des intensités de pluie.
4. Affaiblissements dus aux précipitations.
5. Conclusion.

Bibliographie (6 réf.).

1. INTRODUCTION

L'affaiblissement par la pluie sur une liaison radioélectrique terrestre en visibilité est dû essentiellement à l'absorption et à la diffusion de l'onde électromagnétique par les gouttes contenues dans la première zone de Fresnel de la liaison.

Les statistiques d'affaiblissement nécessaires à l'étude de la faisabilité de la liaison pour une fréquence, une polarisation, un trajet donnés doivent généralement être établies à partir de statistiques de la distribution ponctuelle de la pluie, représentatives de la localité choisie.

La plupart des travaux qui ont été consacrés à ce sujet ont traité des données essentiellement européennes, américaines ou nippones. L'absence des données sur la propagation en Afrique et particulièrement sur les pluies équatoriales et tropicales a été jusqu'ici un gros handicap pour la détermination d'un modèle adapté à la distribution de l'intensité ponctuelle de la pluie, et a posé de sérieux problèmes pour le calcul de nombreuses liaisons hertziennes lors de la planification du réseau panafricain des Télécommunications (PANAFTEL).

* Stagiaire Doctorat Ingénieur CNET. RPE PAB/CNET, 38, rue du général Leclerc, 92131 Issy-les-Moulineaux.

Cependant depuis plus d'un an, l'administration congolaise des Postes et Télécommunications, aidée matériellement par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), entreprend en collaboration avec le CNET une campagne de mesures d'intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie, en climat équatorial et tropical.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'étude présentée ici a été effectuée sur le tronçon Brazzaville - PK 45 de la liaison hertzienne (PANAFTEL) reliant Brazzaville (R. P. Congo) à Bangui (République Centrafricaine).

Les caractéristiques sont les suivantes :

- fréquence 7 GHz,
- longueur du trajet 33,5 km,
- polarisation horizontale,
- hauteur des paraboles 20 m et 70 m au-dessus du sol,
- diamètre et gain des antennes : 2 m et 40,6 dB,
- le profil de la liaison est donné sur la figure 1.

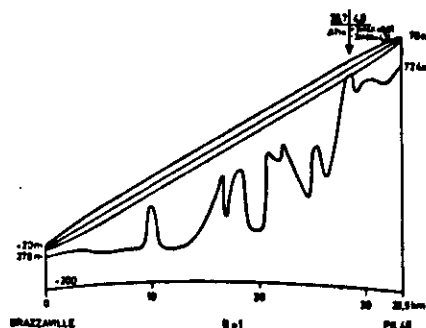


FIG. 1. — Profil de la liaison.
Path profile.

On a installé trois pluviomètres à augets basculants ayant un temps d'intégration de 6 min le long du parcours radioélectrique, dont un à chaque extrémité et à mi-parcours. Du fait d'un mauvais fonctionnement de l'un des trois pluviomètres, on ne trouvera ici que les résultats des mesures des stations de Brazzaville et du PK 45.

Il est bien connu que les deux phénomènes pouvant conduire à des erreurs dans l'estimation des hautes intensités de pluies mesurées au moyen d'un pluvio-

mètre sont :

- l'effet des tourbillons du vent,
- le temps d'intégration du pluviomètre [1].

Afin d'atténuer le premier phénomène, les pluviomètres ont été installés à des endroits suffisamment dégagés des bâtiments.

D'autre part, les intensités de plus de 100 mm/h enregistrées aux deux stations sont relativement peu nombreuses par rapport à l'ensemble de relevés pluviométriques, et par conséquent le temps d'intégration des pluviomètres ne joue pas un rôle important pour les résultats que nous avons obtenus.

Les affaiblissements sont évalués à partir des mesures de champ effectuées à l'aide d'un enregistreur analogique branché en permanence sur la commande automatique de gain du récepteur situé à la station de Brazzaville.

3. MODÉLISATION DES INTENSITÉS DE PLUIE

Les deux modèles couramment utilisés et qui ont été établis à partir des mesures directes effectuées au Japon, en Europe et aux Etats-Unis, sont la distribution gamma et la distribution log-normale.

On a montré [2] que la distribution log-normale convient surtout bien pour les intensités de pluies faibles et moyennes, alors que la distribution gamma représente bien les intensités de pluies moyennes et fortes. La jonction entre ces deux distributions asymptotiques se fait vers 20 à 50 mm/h (selon les climats), ce qui est parfois gênant pour les applications car cela correspond à des valeurs ayant une grande importance pratique.

Il semble possible de représenter la distribution des intensités de pluie par une seule fonction dans toute la gamme des valeurs utiles.

En effet, si l'on considère des intensités de pluie supérieures à 2 mm/h, l'analyse des données que nous avons obtenues conduit à proposer une loi de probabilité expérimentale de la forme :

$$(1) \quad P(R > r) = a \frac{e^{-r}}{r^u} \quad \text{avec } r > 2 \text{ mm/h,}$$

où a , b et u sont trois paramètres qui dépendent du temps d'intégration du pluviomètre utilisé, et aussi de la zone climatique.

Cette loi rend mieux compte de la distribution du taux de précipitation à Brazzaville (13 mois de mesure) et au PK 45 (11 mois de mesure) que la distribution log-normale ou de la distribution gamma qui sont en fait des lois limites à la loi que nous proposons.

Les valeurs des paramètres a , b et u qui ont été déterminées à partir de nos données au moyen d'un

programme informatique de régression linéaire sont données dans le tableau I.

TABLEAU I. — Valeurs des paramètres a , u et b pour les stations de Brazzaville et PK 45 et pour le trajet Brazzaville - PK 45.

Values of the a , u and b parameters for stations of Brazzaville and PK 45 and for Brazzaville - PK 45 terrestrial path.

	a	u	b
Brazzaville	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$	0,6332
km 45	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	0,54
Ensemble du trajet	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,63

Seules les intensités au moins égales à 4 mm/h ont été prises en considération, car elles ont été mesurées avec plus de précision que celles inférieures à cette valeur.

On compare sur les figures 2, 3, 4, les valeurs

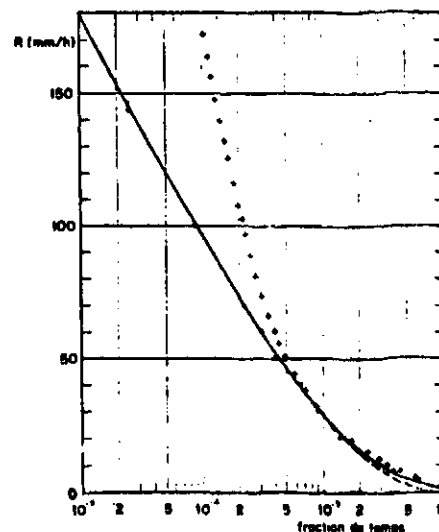


FIG. 2. — Distribution des intensités de pluie à Brazzaville (période de la mi-avril 1980 au 30 avril 1981).
 $\Delta T = 6$ min.

Rainfall distribution at Brazzaville.
(April 1980 to April 1981).

- Données expérimentales.
Experimental data.
- ++++ Loi log-normale $P_0 = 10\%$.
Log-normal model.
- Loi gamma $R_0 = 46$ mm/h, $v = 2,3 \cdot 10^{-3}$.
Gamma model.
- Loi proposée $a = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $b = 0,6338$,
 $u = 2,31 \cdot 10^{-3}$.
Our model.

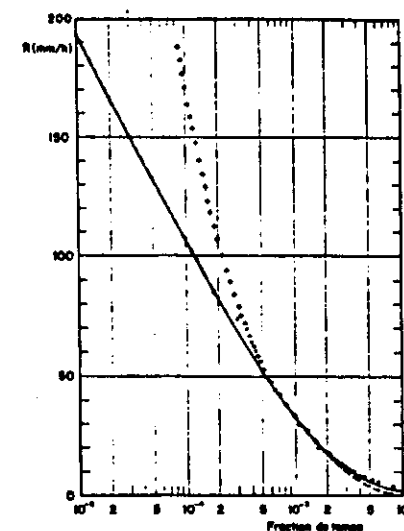


FIG. 3. — Distribution des intensités de pluie au PK 45 (période de juin 1980 à avril 1981).
 $\Delta T = 6$ min.

Rainfall distribution at PK 45
(June 1980 to April 1981).

- Points expérimentaux.
Experimental data.
- ++++ Loi log-normale $P_0 = 10\%$.
Log-normal model.
- Loi gamma $R_0 = 48,5$ mm/h, $v = 2,6 \cdot 10^{-3}$.
Gamma model.
- Loi proposée $a = 1,48 \cdot 10^{-3}$, $b = 0,54$,
 $u = 2,33 \cdot 10^{-3}$.
Our model.

expérimentales obtenues dans chacune des deux stations et la moyenne des intensités sur l'ensemble du trajet, aux valeurs calculées à partir de la loi (1), de la loi gamma et de la loi log-normale.

Le paramètre P_0 qui représente pour la distribution log-normale le pourcentage de temps pendant lequel il pleut sur toute l'année est de l'ordre de 10 % pour le Congo, tandis que les paramètres v et R_0 de la distribution gamma sont déterminés en ajustant la courbe théorique pour des intensités de pluie supérieures ou égales à 30 mm/h aux données expérimentales.

Comme on peut le remarquer, le modèle défini par la relation (1) rend bien compte des résultats expérimentaux, tant pour les faibles intensités que pour les fortes intensités de pluie.

On constate aussi que sur les figures 3 et 4, entre 10^{-3} et 10^{-4} du temps, les courbes expérimentales présentent une bosse, alors que sur la figure 2 ce phénomène disparaît. Ceci est dû au fait que la

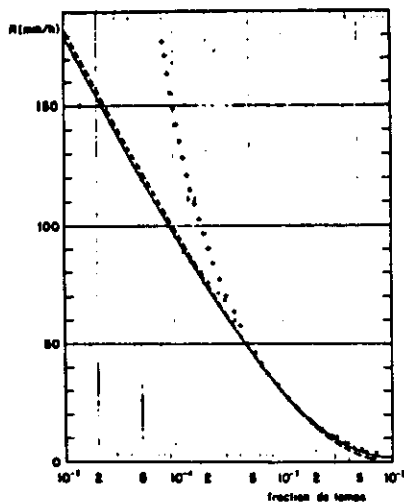


FIG. 4. — Intensités de pluies moyennes sur le trajet Brazzaville - PK 45. (Période juin 1980 à avril 1981). $\Delta T = 6$ min.

Mean rainfall distribution on Brazzaville - PK 45 terrestrial path.

- Points expérimentaux.
Experimental data.
- Loi log-normale $P_0 = 10\%$.
Log-normal model.
- ++++ Loi gamma $R_0 = 46$ mm/h, $v = 2.5 \cdot 10^{-3}$.
Gamma model.
- Loi proposée $a = 1.6 \cdot 10^{-6}$, $b = 0.62$,
 $U = 2.3 \cdot 10^{-3}$.
Our model.

courbe de la figure 2 a été tracée avec un plus grand nombre de données (13 mois de mesure) que les courbes 3 et 4 qui ne correspondent qu'à 11 mois de mesure.

4. AFFAIBLISSEMENTS DUS AUX PRÉCIPITATIONS

À la fréquence considérée, mis à part les affaiblissements par trajets multiples, la seule cause des affaiblissements en climat équatorial et tropical pour les fractions de temps de 10^{-2} à 10^{-5} qui intéressent l'ingénieur des télécommunications est la pluie.

On sait qu'en Europe et aux États-Unis (Debrunner et Liniger 1975, Crane 1979), la structure horizontale des précipitations est caractérisée par des cellules de pluies pouvant atteindre 3 km pour des intensités dépassant 40 mm/h. D'autre part, la probabilité de

trouver un grand nombre de ces cellules sur un trajet radioélectrique assez long est évidemment plus grande que sur un trajet court ; elle l'est d'autant plus que les intensités sont faibles.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour prévoir les statistiques d'affaiblissements dus à la pluie sur un trajet à partir des mesures du taux de précipitation, nous en utiliserons 3 :

La loi empirique de S. H. Lin [3], le modèle de F. Fedi [4], le modèle de R. Crane [5].

4.1. Le modèle empirique de S. H. Lin.

Le modèle empirique de S. H. Lin du calcul de l'affaiblissement dû à la pluie sur une liaison terrestre est applicable aux intensités de pluie mesurées avec un temps d'intégration de 5 min. Il est basé sur le concept de coefficient de réduction de la longueur du trajet. L'affaiblissement est donné par :

$$(2) A(R_0, L) = KR_0^a LK_1(R_0, L),$$

avec :

$$(3) K_1(R_0, L) = \frac{1}{1 + L[(R_0 - 6.2)/2636]} \quad (R_0 > 10 \text{ mm/h}).$$

4.2. Le modèle de F. Fedi.

Ce modèle fait, lui aussi, intervenir un coefficient de réduction de la longueur du trajet. Il consiste à calculer d'abord l'affaiblissement pour 0,01 % du temps à partir de l'intensité de pluie qui correspond à ce pourcentage de temps, puis on calcule l'affaiblissement pour divers pourcentages P du temps à l'aide de la formule suivante :

$$(4) A_P = A_{0.01} \left(\frac{P}{0.01} \right)^{-a},$$

où le coefficient a est égal à :

$$\begin{aligned} 0.33 & \text{ pour } 0.001 \% < P < 0.01 \% \\ 0.41 & \text{ pour } 0.01 \% < P < 0.1 \% \end{aligned}$$

et où $A_{0.01}$, affaiblissement dépassé pendant 0,01 % du temps, est donné par :

$$(5) A_{0.01} = v_R l_{\text{eff}} = v_R L_r,$$

l_{eff} étant la longueur équivalente de la liaison que l'on obtient, en première approximation en multipliant la longueur réelle L de la liaison par le coefficient :

$$(6) r = 90/(90 + 41)$$

et v_R (dB/km) étant l'affaiblissement linéique calculé pour une fréquence donnée et pour une polarisation déterminée pour le taux de précipitation dépassé pendant 0,01 % du temps, avec un temps d'intégration d'une minute.

4.3. Le modèle de R. Crane.

Dans ce modèle, la probabilité $P_2(A)$ pour que l'affaiblissement A soit dépassé sur un trajet de longueur D_2 est proportionnelle à la probabilité $P_1(A)$ pour que l'affaiblissement A soit dépassé sur un trajet de longueur D_1 .

$$(7) P_2(A) = \frac{D_2}{D_1} P_1(A),$$

(8)

$$A(R_0, D) = KR_0^a \left[\frac{e^{aD} - 1}{aD} \right] - \frac{b^a e^{aD}}{aD} + \frac{b^a e^{aD}}{aD},$$

$$(9) A(R_0, D) = KR_0^a \left[\frac{e^{aD} - 1}{aD} \right], \quad D < d,$$

avec

$$(10) u = \frac{\log_e(b e^{aD})}{d},$$

$$(11) b = 2.3 R_0^{0.17},$$

$$(12) c = 0.026 - 0.03 \log_e R_0,$$

$$(13) d = 3.8 - 0.6 \log_e R_0,$$

où les R_0 sont les intensités ponctuelles mesurées en 1 min.

Pour des liaisons de longueur supérieure à $D_0 = 22.5$ km, on remplace (R_0, D) dans (8) par

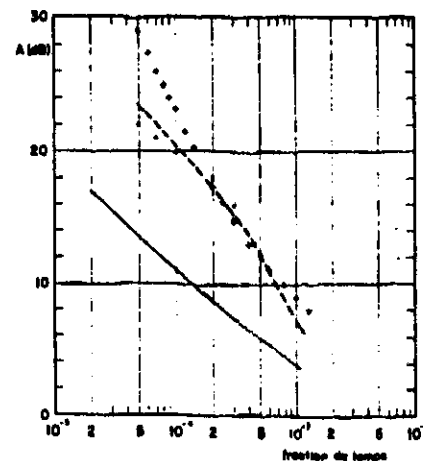


FIG. 5. — Affaiblissements dus à la pluie (liaison Brazzaville - PK 45; 33.5 km; 7 GHz; polar H).

Rainfall attenuation (Brazzaville - PK 45 path; 33.5 km; 7 GHz; H polar).

- mesurés
measured
- Calculés avec des intensités de pluie corrigées.
Calculated with corrected rainfall rates.
- ++++ Fedi, $\Delta T = 1$ min.
- Crane, $\Delta T = 1$ min.
- Lin, $\Delta T = 5$ min.

(R_0, D_0) où les R_0 sont des intensités ponctuelles mesurées pour la probabilité modifiée :

$$(14) P' = \frac{D_0}{D} P.$$

Dans ces trois modèles, on calcule l'affaiblissement linéique v_R en dB/km par la formule : $v_R = k R^a$ dans laquelle k et a sont des fonctions de la fréquence, mais dépendent aussi un peu de la température et de la polarisation du champ incident.

On a choisi pour la fréquence de la liaison, les valeurs données à la température d'eau de pluie de 20°C par Olsen [6] :

$$k = 3.10^{-3} \quad a = 1.32$$

et on a présenté sur la figure 5, les courbes calculées à l'aide des trois modèles de prévision des affaiblissements et la courbe expérimentale tracée à partir de nos données.

Les corrections faites sur les intensités de pluie (corrections du temps d'intégration : S. H. Lin) afin de tracer les courbes théoriques de la figure 5 nous paraissent trop fortes pour les pluies équatoriales. Cependant l'effet du temps d'intégration sur les intensités de pluie équatoriale ou tropicale n'est pas encore bien connu à ce jour, et en l'absence des coefficients de correction propres à ces climats, on a présenté sur la figure 6 des courbes d'affaiblissement

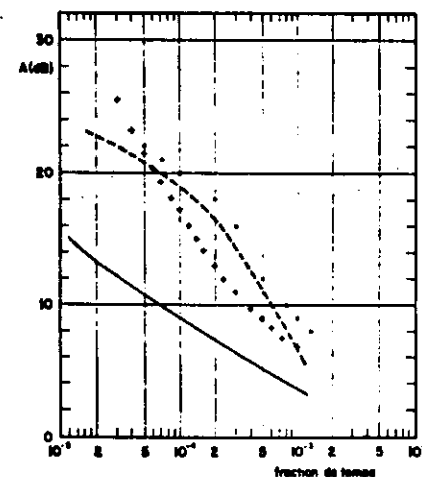


FIG. 6. — Affaiblissements dus à la pluie (liaison Brazzaville - PK 45).

Rainfall attenuation (Brazzaville - PK 45).

- Mesurés.
Measured.
- Calculés avec des intensités de pluie en 6 min.
Calculated with 6 min rainfall rate.
- ++++ Fedi.
- Crane.
- Lin.

théoriques à partir des intensités de pluies mesurées avec un temps d'intégration de 6 min et non corrigées.

5. CONCLUSION

1. Nous avons proposé une relation permettant de calculer la distribution des intensités de pluie en zone tropicale et équatoriale qui est bien vérifiée par les données expérimentales dont nous disposons aussi bien pour les faibles intensités que pour des fortes intensités de pluie.

Nous nous proposons de vérifier plus précisément la validité de cette loi en utilisant des données recueillies sur une plus longue période et d'autres zones climatiques.

2. Un examen des trois modèles de prévision des affaiblissements dus à la pluie que nous avons utilisés

montre que :

— lorsque le temps d'intégration des intensités de pluie est respectivement de 5 min et 1 min, les modèles [3] et [4] rendent assez bien compte des données expérimentales dont nous disposons, pour les fractions de temps comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} , tandis que le modèle [5] s'en écarte (Fig. 5) ;

— pour un temps d'intégration de 6 min, seul le modèle [3] s'écarte peu des points expérimentaux (Fig. 6).

REMERCIEMENTS.

Nous remercions le Professeur Jean-Pierre Mon pour avoir aidé à la rédaction de cet article et Monsieur Boithias pour ses conseils.

Manuscrit reçu le 21 mai 1981,

accepté le 15 janvier 1982.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FEXE (F.). Attenuation due to rain on a terrestrial path. *Atta Frequenza*, Ital. (1979), 48, pp. 167-184.
- [2] BORNUEAS (L.). Au sujet de la loi de distribution statistique des intensités de pluie. *Ann. Télécommunic.*, Fr. (1980), 35, n° 9-10, pp. 365-366.
- [3] LIN (S. H.). Nationwide long-term rain rate statistics and empirical calculation of 11 GHz microwave rain attenuation. *Bell. Syst. tech. J.*, USA 1977, 54, pp. 1581-1604.
- [4] FEXE (F.). Normalization procedures and prediction techniques for rain attenuation on terrestrial and earth-space radio links. *IEEE Conf. Proc.* n° 195 (1981).
- [5] CRANE (R. K.). Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. COM*, USA (1980), 28, n° 9, pp. 1717-1733.
- [6] OLSEN (R. L.). The αR^b relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. AP*, USA (1978), 26, n° 2, pp. 318-329.

ARTICLE 2

EMPIRICAL MODEL FOR RAINFALL RATE DISTRIBUTION

Indexing terms: Radiowave propagation, Rain

An empirical but theoretically sound law derived from rainfall measurements obtained in the Congo (tropical and equatorial climates), and which provides a good fit of rainfall rate distributions observed in various hydrometeorological zones of the world, is presented. The rainfall rate distribution model is compared with the gamma and log-normal ones.

Studies carried out on measurements made in Europe, Japan and USA, have shown that rainfall rate cumulative distributions cannot be accurately represented by the log-normal distribution nor the gamma distribution.

Although it appears that the first law is the best approximation for low rainfall rates and that the second one is a good approximation to high precipitation rates, the validity domain of both distributions is related to the investigated hydrometeorological area; this is also the case for the power relation law proposed by Segal² and derived from measurements obtained in Canada.

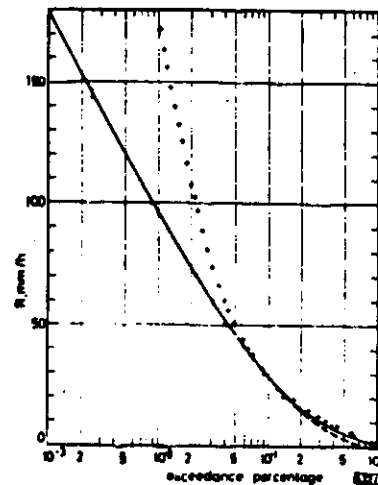


Fig. 1 Rain statistics at Brazzaville (Congo) 1980-1981

Integration time = 6 min
 + + + log-normal approximation $P_0 = 10\%$
 - - - gamma approximation $c = 2.3 \times 10^{-3}$, $R_0 = 46$ mm/h
 — empirical law (eqn. 1) $\begin{cases} a = 1.6 \times 10^{-2} \\ b = 0.6338 \\ u = 2.31 \times 10^{-3} \end{cases}$
 ●●● experimental data

Moreover, the junction between the gamma and log-normal laws occurs at about 20 to 30 mm/h according to the climates, and the divergence between the validity domains of both models which show an asymptotic behaviour relative to rainfall rate distributions gives rise to difficulties as far as the needs for communications are concerned.

As rainfall data from equatorial and tropical countries have not been available for a very long time, it was not possible to develop a rainfall rate statistical distribution model adapted to such hydrometeorological areas which suffer very high rain rates. This is a serious drawback as the highest rain rates are usually the most critical ones for designing radiocommunication systems.

However, recent investigations carried out by F.

33

Mouplouma³ on rainfall rate measurements obtained during a period of more than one year in Brazzaville (People's Republic of Congo) in equatorial and tropical climate, show that it is possible to represent rainfall rate distribution by a single function for the whole range of relevant values leading to an experimental probability law of the following form:

$$P(R \geq r) = a \frac{e^{-u}}{r^b}, \quad r > 2 \text{ mm/h} \quad (1)$$

where a , b and u are constants depending on the integration time and on the climate type, and may be calculated by means of linear regression computer program.

Fig. 1 shows that this empirical law (eqn. 1) behaves as a gamma distribution for the higher rain rates and as a log-normal distribution for the lower ones, in equatorial and tropical climates.

In Fig. 2, rainfall rate data from various hydrometeorological areas^{4,5} are fitted by the proposed distribution law. As can be seen, very good agreement is achieved both at higher and lower rates.

Parameters a , b and u in the empirical model of eqn. 1 must fulfil the following conditions:

$$F(r) = P(R \leq r) \quad (2)$$

is the distribution function of the rainfall rate r , it follows that

$$F(r) = 1 - P(R \geq r) \quad (3)$$

$$F(r) = \begin{cases} 1 - a \frac{e^{-u}}{r^b} & r > 0 \\ 0 & r \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F(+\infty) = 1, \text{ which implies } u > 0 \text{ and } b > 0 \quad (5)$$

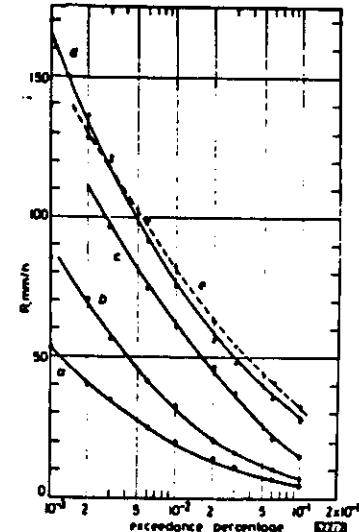


Fig. 2 Rain statistics

Examples of empirical law (eqn. 1) approximations:
 a Kjeller (Norway) 1975-1976: $a = 1.4 \times 10^{-2}$, $b = 1.53$, $u = 2.2 \times 10^{-3}$
 b Paris (France) 1975-1977: $a = 1.32 \times 10^{-2}$, $b = 1.27$, $u = 1.62 \times 10^{-3}$
 c Roma (Italy) 1 year: $a = 1.16 \times 10^{-2}$, $b = 0.771$, $u = 2.464 \times 10^{-3}$
 d Palmietto (USA) 2 years: $a = 0.865$, $b = 1.907$, $u = 1.02 \times 10^{-2}$
 e Calcutta India (combined 1979-1980): $a = 0.236$, $b = 1.39$, $u = 2.014 \times 10^{-3}$
 Integration time = 1 min

therefore the model of eqn. 1 has the following probability density:

$$\frac{dF}{dr}(r) = f(r) = \begin{cases} a \frac{e^{-u}}{r^2} \left(u + \frac{b}{r} \right) & r > 0 \\ 0 & r \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

One thus has a finite distribution. As $F(r)$ is always an increasing function, $f(r)$ is always positive and therefore $a > 0$, since $u > 0$ and $b > 0$.

For the various applications investigated, it has been found that eqn. 1 could be used with $0 < a < 1$; $0 < u < 1$, $b > 0$.

On the other hand, a theoretical investigation by J. Dereffye,⁶ carried out independently from the above experimental law and relying on a representation of the rainfall phenomenon by a random process, resulted in the development of a general rain rate distribution model, the asymptotic behaviour of which is a log-normal distribution for lower rain rates, and a gamma distribution for higher rain rates.

J. Dereffye simplified his general model and arrived at the probability distribution

$$P(R \geq r) = \left(\frac{z_0 + R_0}{z_0 + r} \right)^a e^{-az_0 - az_0/r} \quad (7)$$

which shows the same asymptotic behaviour.

It may be seen that for $z_0 = 0$, and $R_0 e^{az_0} = a$; eqn. 7 is reduced to the empirical model given by the eqn. 1.

Thus the empirical law of eqn. 1, which relies on three parameters, appears to be theoretically sound and provides a very good representation of the rainfall rates observed in the various hydrometeorological zones of the world.

We are now investigating the possibility of setting constant one out of the three parameters for each climatic area.

Acknowledgments: The authors wish to thank Prof. Jean-Pierre Mon for advice and guidance and Dr. Peter Gole for reviewing this manuscript.

F. MOUPFOUMA
CNET Paris B/RPE
38-40 avenue General Leclerc
92131 Issy Les Moulineaux, France

19th April 1982

J. DEREFFYE
Thomson CSF DRS/STS/TA
BP 10, 1, rue de Mathurins
92223 Bagneux Cedex, France

References

1. GUTTMAN, L.: 'On the statistical distribution of rain rate', *Ann. Telecom.*, 1960, 35, pp. 9-10.
2. SIGAL, B.: 'High-intensity rainfall statistics for Canada', CRC report 1329 E, Nov. 1979.
3. MOUPFOUMA, F.: 'Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical', *Ann. Telecom.*, 1982, to be published.
4. REDI, P.: 'A simple method for predicting rain attenuation statistics on terrestrial and earth-space paths', RIF 1B 1081, Fondazione UGO Bordoni, sede legale, Viale Traversera, 108, 00153 ROMA, 1981.
5. CCIR, 1978-82, Doc India.
6. DEREFFYE, J.: 'Modélisation mathématique des intensités de pluie en un point de sol', *Rev. Stat. Appl.*, 1982, to be published.

0013-5194/82/110460-02\$1.50/0

TWO-PARAMETER EMPIRICAL MODEL FOR RAINFALL RATE DISTRIBUTION

Indexing terms: Rainfall; propagation; Rain

In a previous paper we suggested a three-parameter model providing a good fit for rate distribution. Moreover, this model approximates a log-normal distribution at low rates and a gamma distribution at high rates. In the latter we reduced the number of parameters to two by setting the third one constant. This modified model appears to give good agreement with the experimental data gathered in various locations around the world.

Log-normal and gamma distributions can provide rather good approximations for low and high rainfall rates, respectively, but, as is well known, none of these models can accurately account for rainfall rate cumulative distribution.¹

Recently, from rainfall measurements carried in Brazzaville (Congo),² the author suggested^{3,4} an empirical but theoretical sound model⁵ providing a better fit for a rain-rate cumulative distribution. This model involves a single function for the whole range of relevant values, approximating the gamma distribution at high rain rates and the log-normal distribution at the low rates.

According to this model, the probability that a rainfall rate R exceeds r is given by

$$P(R \geq r) = a \frac{e^{-br}}{r^a}, \quad r \geq 2 \text{ mm/h} \quad (1)$$

where a , b and u are parameters depending on the integration time of the rain gauge and on the climate.

Then, the distribution function of the rain rates r and its probability density are given by

$$F(r) = P(R \leq r) = 1 - P(R \geq r) \quad (2)$$

$$f(r) = \frac{dF(r)}{dr} \quad (3)$$

From these equations it has been shown⁶ that: $0 < a < 1$; $0 < u < 1$; $b > 0$.

In previous papers we considered the possibility of setting constant one out of these parameters for all climatic areas, in order to reduce the number of parameters. This is achieved in this letter.

The comparison of our empirical model with the gamma and log-normal distributions was already discussed⁴⁻⁶ and here we will merely give some examples of our empirical law approximations with one fixed parameter.

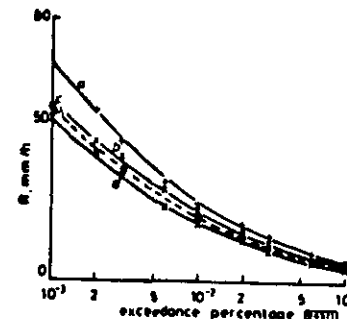


Fig. 1 Rain-rate statistics

a Stockholm (Sweden)	1976-77	$a = 0.012$; $b = 1.29$
b Darmstadt (W. Germany)	1976	$a = 0.014$; $b = 1.45$
c Kjeller (Norway)	1975-76	$a = 0.012$; $b = 1.45$
d Mendlesham (UK)	1973-75	$a = 0.01$; $b = 1.44$

Integration time = 1 min

The value of u which leads to the best fit of the various hydrometeorological zones is

$$u = 2.5 \times 10^{-2}$$

a and b being functions of the climate and the integration time.

Figs 1 and 2 show rainfall rate data from various countries^{1,2} fitted by our model.

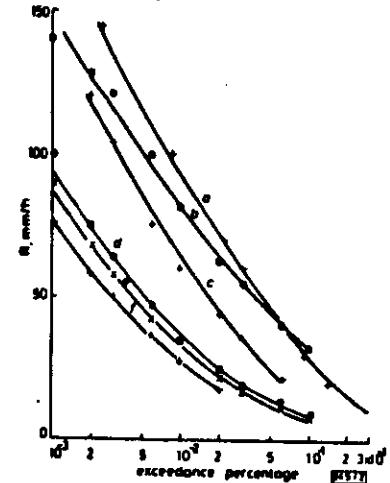


Fig. 2 Rain-rate statistics

a Brazzaville (Congo)	1980-81	$a = 1.44 \times 10^{-2}$; $b = 0.57$
Integration time = 6 min		
b Calcutta (India)	1979-80	$a = 0.1$; $b = 1.1$
c Holmdel (USA)	1968-69	$a = 6 \times 10^{-3}$; $b = 0.59$
d Fucino (Italy)	1975-77	$a = 0.011$; $b = 1.03$
e Paris (France)	1972-77	$a = 0.01$; $b = 1.07$
f Louvain-la-Neuve (Belgium)	1970-75	$a = 7.56 \times 10^{-3}$; $b = 1.09$
Integration time = 1 min		

In its report 563-2³ (see Table 1 and Figs. 11 to 13), CCIR gives rain hydrometeorological zone intensities across the world.

We fitted with our model the data obtained in zones E, D, G, H, K, L, M and N. The results are plotted on Fig. 3, together with the values of the parameters for each zone. As can be seen in Figs. 1 to 3, very good agreement is achieved both at higher and lower rates.

Comparing Figs. 1 and 2 with Fig. 3, it can be noted that:

(a) parameters $a = 0.012$ and $b = 1.29$ for Stockholm (Sweden) (Fig. 1) are rather close to $a = 9.5 \times 10^{-3}$ and $b = 1.25$ of the CCIR hydrometeorological zone E (Fig. 3) to which Stockholm belongs (see Fig. 12 report 563-2 CCIR).

(b) calculations leading to the curves of Fig. 1 show that $a = 0.014$; $b = 1.45$ for Darmstadt (FGR); $a = 0.012$; $b = 1.45$ for Kjeller (Norway); $a = 0.01$; $b = 1.44$ for Mendlesham (UK).

These three pairs of values are quite close. The explanation may be that these three locations, particularly the first two, are crossed by the same type of perturbing stream, while according to the CCIR classification Mendlesham is in zone E with $a = 9.5 \times 10^{-3}$ and $b = 1.25$; Kjeller in G with $a = 0.018$ and $b = 1.97$; Darmstadt in H with $a = 2.23 \times 10^{-3}$ and $b = 1.29$ (see Fig. 3).

This common perturbing stream could be located in Fig. 3, between the rain hydrometeorological zones D and E. The same remarks apply for Paris (France) and Louvain-la-Neuve (Belgium), which are located in the hydrometeorological zones H and E, respectively (see Figs. 2 and 3).

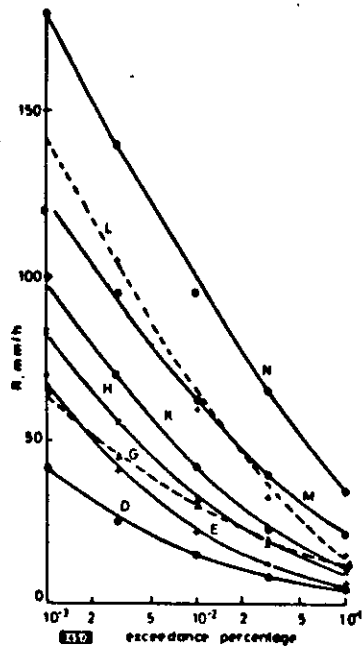


Fig. 3 Fit of CCIR rainfall climatic zones intensities with our empirical law

N	$a = 1.94 \times 10^{-2}$	$b = 0.6$
M	$a = 7.12 \times 10^{-2}$	$b = 1.2$
L	$a = 6.69 \times 10^{-2}$	$b = 0.605$
K	$a = 1.93 \times 10^{-2}$	$b = 1.12$
H	$a = 2.23 \times 10^{-2}$	$b = 1.29$
G	$a = 9.16 \times 10^{-3}$	$b = 1.97$
E	$a = 9.5 \times 10^{-3}$	$b = 1.25$
D	$a = 1.62 \times 10^{-3}$	$b = 1.07$

Also the rain intensity probability law in Holmdel (USA) is characterised by parameter values $a = 6 \times 10^{-2}$ and $b = 0.59$ (see Fig. 2) which are nearly the same as those of hydrometeorological zone L ($a = 6.69 \times 10^{-2}$, $b = 0.605$) (Fig. 3), while according to the CCIR classification, Holmdel is found in zone K.

We guess that these discrepancies could be accounted for by climatic perturbations extending over a large part of the defined rain hydrometeorological zone, or by local geographical effects.

Thus examination of Figs. 1 to 3 shows that our two-parameter model provides a good fit to the rainfall rate distributions measured in various hydrometeorological zones.

F. MOUPFOUMA

CNET PARIS B RPE
38-40, rue du General Leclerc
92131 Issy-les-Moulineaux, France

8th July 1983

References

1. BRYTHAS, L.: 'On the statistical distribution of rain rate', *Ann. Telecom.*, 1980, 35, pp. 9-10.
2. MOUPFOUMA, F.: 'Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical', *ibid.*, 1982, 37, pp. 123-128.
3. CCIR XVII Plén. Ass., Geneva, 1982, V, Report 543-2.
4. MOUPFOUMA, F., and DE RIPPY, J.: 'Empirical model for rainfall rate distribution', *Electron. Lett.*, 1982, 18, pp. 460-461.
5. DE RIPPY, J.: 'Modélisation mathématique des intensités de pluie en un point de sol', *Rev. Stat. Appl.*, 1982, 30, pp. 39-63.
6. MOUPFOUMA, F.: 'Etude de la propagation radioélectrique en climat équatorial et tropical', *Thèse Doctorat Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, CNET RPE, December 1982*.
7. PEDR, F.: 'A simple method for predicting rain attenuation statistics on terrestrial and earth-space paths', RIF 10 1081, Fondazione Ugo Bordoni, sede legale, Viale Trastevere, 108, 00153 Roma, 1981.
8. CCIR, 1978-82, Doc India.

ARTICLE 4

Model of rainfall-rate distribution for radio system design

F. Moupfouma, Dr.Eng.

Indexing terms: Radiowave propagation, Precipitation

Abstract: Owing to the interest raised by the precipitation effects in the design of satellite and terrestrial microwave radiolinks, it is necessary to have a simple and valuable mathematical model which can represent, with good accuracy, the whole rain-rate distribution, from lowest rain-rate values to the tail of this distribution. Previously the author suggested a two-parameter model which adequately represents the rainfall intensity cumulative distributions for several hydrometeorological zones of the world. This model has log-normal asymptotic behaviour for low rainfall rates, and gamma asymptotic behaviour for the high ones. The present paper deals with a further improvement by expressing both parameters as a function of the rainfall rate exceeded during 0.01% of the time, and recommended by the CCIR to evaluate the availability of microwave radio links.

1 Introduction

The object of the present paper is to derive an empirical and very simple model which provides a good description of the global cumulative rainfall-rate distribution for intensities above 2 mm/h, for both high rainfall rates and low rainfall rates, and which is useful for radio system designers.

In a previous paper, the author suggested a three-parameters model giving a good description of the rainfall-rate distribution. This model is asymptotic to a gamma distribution for high rain rates, and to a log-normal distribution for low rain rates [1, 2, 3]. In another version [4], one of the parameters was set constant, thus leading to a two-parameters model.

In this paper, a new improvement is attempted by expressing both variable parameters as a function of the rainfall intensity exceeded during 0.01% of the time. This percentage of time was chosen since it is the rainfall-rate intensity recommended by the CCIR to evaluate the availability of terrestrial and satellite radiowave links.

2 The model

Although log-normal and gamma models, which are extensively used, give a good approximation for low and high rainfall rates, respectively, [6, 7], in many hydrometeorological zones, they are generally not applicable [8, 9]. Moreover, the 'junction point' between these two asymptotic distributions varies between about 20 and 50 mm/h, according to the hydrometeorological climate. For practical applications, in this interval of great interest, this could be troublesome.

From measurements made in Congo-Brazzaville in an equatorial climate, a new empirical rainfall-rate distribution model was proposed [1, 2, 4]. It describes the whole cumulative rainfall intensity distribution for almost all the CCIR hydrometeorological zones in the range of values of interest by means of a unique function given by [2, 4]

$$P(R \geq r) = a \frac{e^{-u}}{r} \quad r \geq 2 \text{ mm/h} \quad (1)$$

$$\text{with } u = 2.5 \times 10^{-2}; 0 < a < 1; b > 0$$

where P represents the probability that the rainfall intensity R (mm/h) exceeds the value r ; a and b are parameters depending on the location and raingauge integration time.

In order to facilitate the use of this empirical law in

each hydrometeorological region, we propose in the following a model where it is only needed to know the rainfall intensity $R_{0.01}$ (mm/h) exceeded during 0.01% of the time.

3 Evaluation of the parameters

3.1 Parameter b

The CCIR last plenary assembly held in Geneva during 1982 gave contour maps of rainfall intensity $R_{0.01}$ (mm/h) exceeded for 0.01% of the time in different hydrometeorological regions of the world [3]. These values are highly interesting since they are used for radiowave attenuation predictions both on line-of-sight and earth-space links [5].

In Table 1, the values of both parameters a and b , computed by linear regression, the values of $R_{0.01}$ (mm/h) and

Table 1: Values of parameters a and b computed using a regression program and rain rates (mm/h) exceeded during 0.01% of the time in various locations

Localities	Integration time (min)	Value of the parameters a and b		$R_{0.01}$ (mm.h)
Brazzaville (Congo)	6	0.57	1.59×10^{-2}	100
Berne (Switzerland)	1	1.04	9.55×10^{-3}	38
Clarksburg (U.S.A.)	1	0.75	8.66×10^{-3}	60
Darmstadt (F.R.G.)	1	1.36	1.01×10^{-2}	22
PK 45 (Congo)	6	0.84	1.73×10^{-2}	106
Keniville (Canada)	1	1.08	9.2×10^{-3}	33
Athens (Greece)	1	1.12	9.78×10^{-3}	30
Kjeller (Norway)	1	1.44	1.08×10^{-2}	20
Korhogo (Ivory Coast)	2	0.49	2.4×10^{-2}	122
Mendlesham (UK)	1	1.52	1.21×10^{-2}	18
Paris (France)	1	1.07	9.5×10^{-3}	33
Quebec (Canada)	1	0.95	9.43×10^{-3}	40
Calcutta (India)	1	0.63	1.24×10^{-2}	82
Stockholm (Sweden)	1	1.29	1.22×10^{-2}	23
Turin (Italy)	1	0.83	8.85×10^{-3}	50
Slough (UK)	5	1.42	1.19×10^{-2}	20

the values of the used raingauge integration time are given for several locations. The parameter b is plotted on Fig. 1a against the value of rainfall intensity exceeded during 0.01% of the time for each location given in Table 1. The corresponding points can be fitted by the relation

$$b = 8.22R_{0.01}^{0.364} \quad (2)$$

Fig. 1a shows a very good agreement with the power-law relation (2).

3.2 Parameter a

Once b is fixed, parameter a can be determined knowing any rain-rate value R (mm/h) for any given time percentage.

Then using $R_{0.01}$ (mm/h) and substituting it into eqn. 1, one has

$$P(R \geq R_{0.01}) = a \frac{e^{-R_{0.01}}}{R_{0.01}^b} = 0.01\% \quad (3)$$

thus

$$a = 10^{-4} R_{0.01}^b e^{R_{0.01}} \quad (4)$$

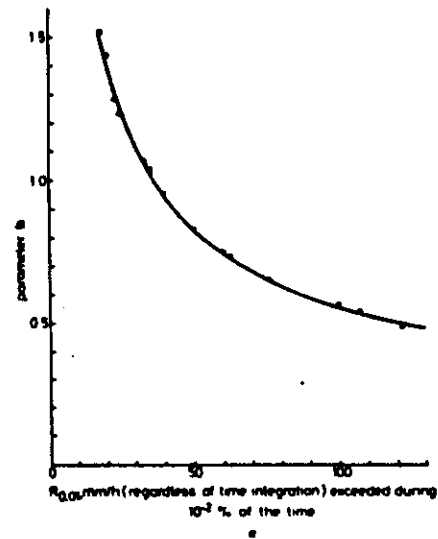


Fig. 1a Behaviour of the parameter a against $R_{0.01}$ (mm/h)
 — a real value from Table 1
 — $a = 8.22 R_{0.01}^{0.186}$

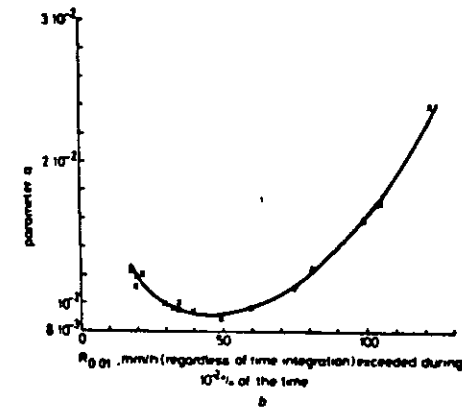


Fig. 1b Behaviour of the parameter b against $R_{0.01}$ (mm/h)
 — b real value from Table 1
 — $b = 10^{-4} R_{0.01}^{0.186} \exp(1 + R_{0.01})$

Values of a found by linear regression and listed in Table 1, and those computed from eqn. 4 are plotted for comparison in Fig. 1b. As may be seen, both results of the calculation compare favourably.

The determination from eqns. 2 and 4 of parameters a and b appearing in expression 1 is an attractive method, since the rainfall-intensity values exceeded during 0.01% of the time are the only ones given by the CCIR contour maps. Thus, to derive a and b , only the value of $R_{0.01}$ is needed.

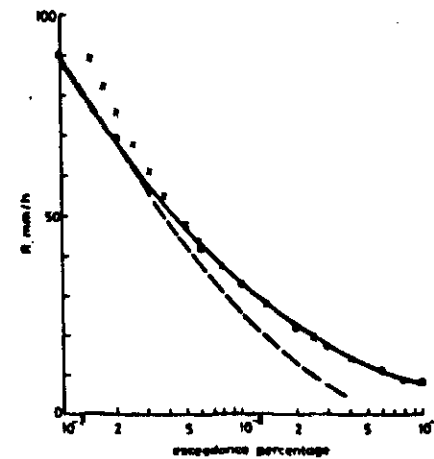


Fig. 2 Comparison between our model (eqns. 1, 2-4) with gamma and log-normal laws
 Rain statistics: Paris—France 14 years
 — $\times$ measured rainfall data
 — $\bullet$ log-normal approximation $P_0 = 3$
 — $\circ$ Gamma approximation $\lambda = 2.2 \times 10^{-4}$, $R_0 = 44$ mm/h
 — $\square$ our model approximation $R_{0.01} = 33$ mm/h
 1 min data

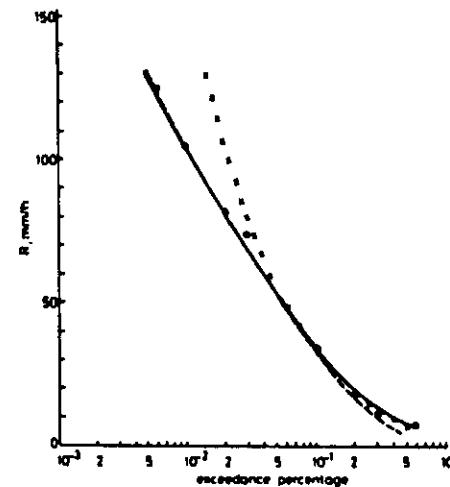


Fig. 3 Comparison between our model (eqns. 1, 2-4) with gamma and log-normal laws
 Rain statistics: P.K. 45 Station - CONGO 2 years
 — $\times$ measured rainfall data
 — $\bullet$ log-normal approximation $P_0 = 10$
 — $\circ$ Gamma approximation $\lambda = 2.6 \times 10^{-4}$, $R_0 = 48.5$ mm/h
 — $\square$ our model approximation $R_{0.01} = 105$ mm/h
 6 min data

As a consequence of the above discussion, relations 2 and 4 have been directly used in eqn. 1 to make a comparison between predicted and experimental data in the following figures.

4 Comparison with experimental results

In order to study the behaviour of the empirical model proposed here, predicted and experimental data obtained in several hydrometeorological areas of the world have been compared in Figs. 2-11.

Figs. 2 and 3 show a comparison of the log-normal and gamma models, and the present one, as given by eqns. 1, 2 and 4, with the experimental data received in Paris (France) during 14 years and in PK-45 (Congo) during 2 years. Values of the parameter P_0 representing the global rain percentage of time in the log-normal distribution and those of parameters λ and R_0 of the gamma distribution were obtained from References 2, 14 and 8, respectively.

Figs. 4 to 11 are approximations of rainfall intensity cumulative distributions measured in equatorial Africa [1, 12]; in Central, Mediterranean, European, and Scandinavian countries [10, 14]; in North America [9, 13] and in Asia [16], using the empirical law we propose here. In each figure, the values of $R_{0.01}$ (mm/h) are indicated.

Examination of all these figures shows that the model summarised by relations 1, 2 and 4 leads to a good fit with

the rainfall-rate distribution in various hydrometeorological areas. Moreover, according to both Figs. 2 and 3, it appears to have a log-normal asymptotic behaviour for low rainfall intensities, and to approach a gamma distribution for the high ones. It may be seen also that for higher

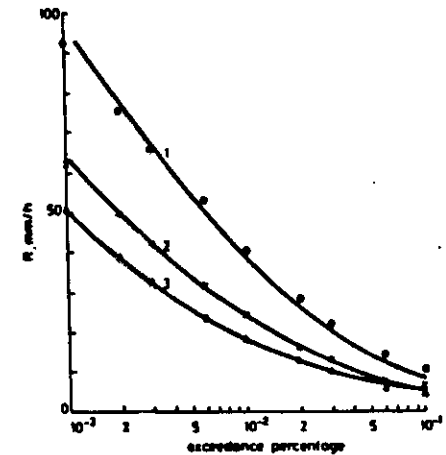


Fig. 5 Cumulative distribution of rainfall intensity in Central Europe
 — $\times$ measured rainfall rates
 — proposed empirical law
 1 Dijon—FRANCE 5 years
 $R_{0.01} = 40$ mm/h
 2 Slough—UK 5 years
 $R_{0.01} = 25$ mm/h
 3 Mendlesham—UK 3 years
 $R_{0.01} = 18$ mm/h
 1 min data

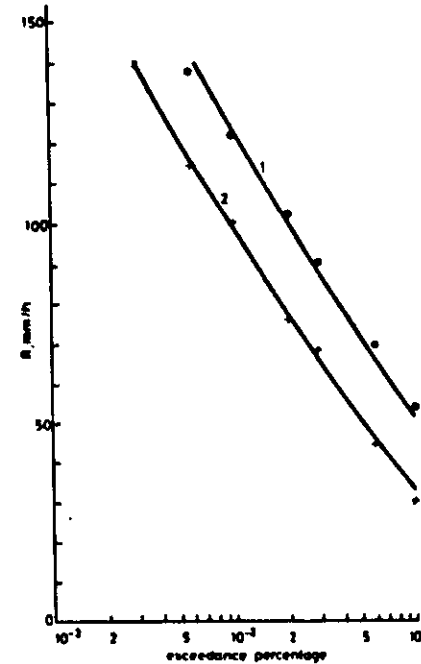


Fig. 4 Cumulative distribution of rainfall intensity in equatorial Africa
 — $\times$ measured rainfall rates
 — proposed empirical law
 1 Karthago—IVORY COAST (less than one year)
 $R_{0.01} = 122$ mm/h
 2 min data
 2 Brazzaville—CONGO 2 years
 $R_{0.01} = 100$ mm/h
 6 min data

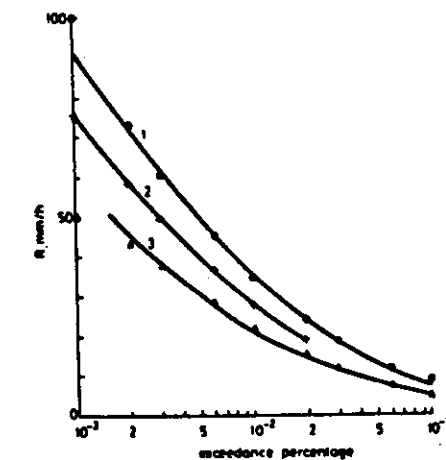


Fig. 6 Cumulative distribution of rainfall intensity in Central Europe
 — $\times$ measured rainfall rates
 — proposed empirical law
 1 Bern—SWITZERLAND 2 years
 $R_{0.01} = 15$ mm/h
 2 Luvain la Neuve—BELGIUM 5 years
 $R_{0.01} = 26$ mm/h
 3 Darmstadt—FRG 2 years
 $R_{0.01} = 22$ mm/h
 1 min data

rain rates (above 100 mm/h) there is a rather sensible difference between predicted results and experimental values. This is not surprising since the accuracy of the model proposed here depends on that of the rain data, especially for

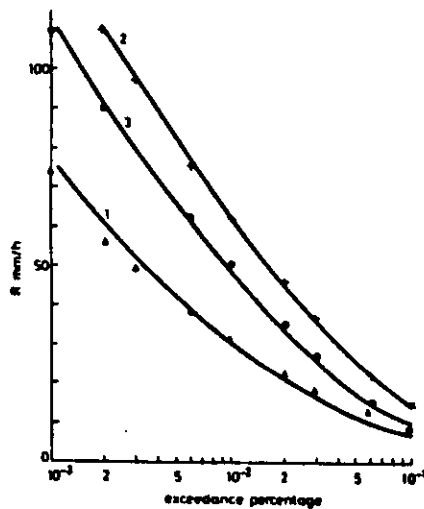


Fig. 7 Cumulative distribution of rainfall intensity in Mediterranean Europe

— + — measured rainfall rates
— — — proposed empirical law
1 Athens—GREECE 1 year
 $R_{0.01} = 30$ mm/h
1 min data
2 Rome—ITALY 1 year
 $R_{0.01} = 62$ mm/h
3 Torino—ITALY 2 years
 $R_{0.01} = 50$ mm/h
1 min data

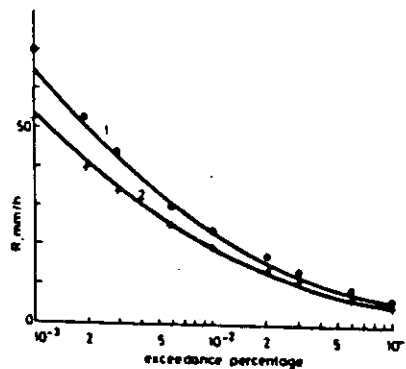


Fig. 8 Cumulative distribution of rainfall intensity in Scandinavian countries

— + — measured rainfall rates
— — — proposed empirical law
1 Stockholm—SWEDEN 2 years
 $R_{0.01} = 23$ mm/h
2 Kjeller—NORWAY 2 years
 $R_{0.01} = 20$ mm/h
1 min data

the high rain intensities for which measurement inaccuracies may occur [9].

It is interesting to note from the above analysis of Figs.

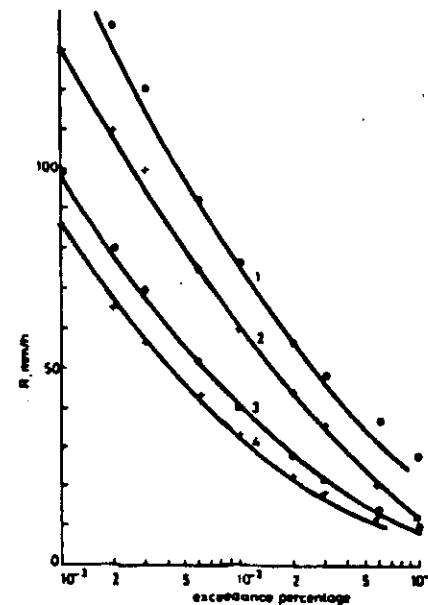


Fig. 9 Cumulative distribution of rainfall intensity in North America

— + — measured rainfall rates
— — — proposed empirical law
1 Palmerton—USA 2 years
 $R_{0.01} = 76$ mm/h
2 Clarkburg, MD—USA 5 years
 $R_{0.01} = 60$ mm/h
3 Quebec, QLE—CANADA 10 years
 $R_{0.01} = 40$ mm/h
4 Kennebec, NS—CANADA 10 years
 $R_{0.01} = 33$ mm/h
1 min data

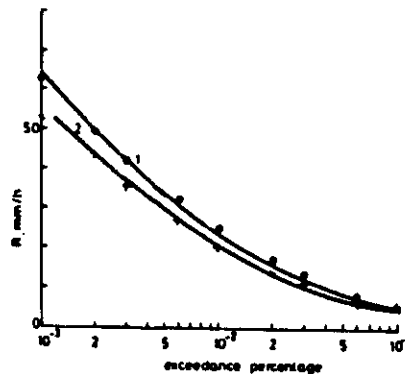


Fig. 10 Effects of integration time on the proposed model's parameters

— + — measured rainfall rates
— — — proposed empirical law
1 Slough, UK 5 years
 $R_{0.01} = 25$ mm/h
1 min data
2 Slough, UK 5 years
 $R_{0.01} = 20$ mm/h
5 min data

2-11, the easy way of characterising any location of interest in any climatic zone with the parametric representation $R_{0.01}$ (mm/h).

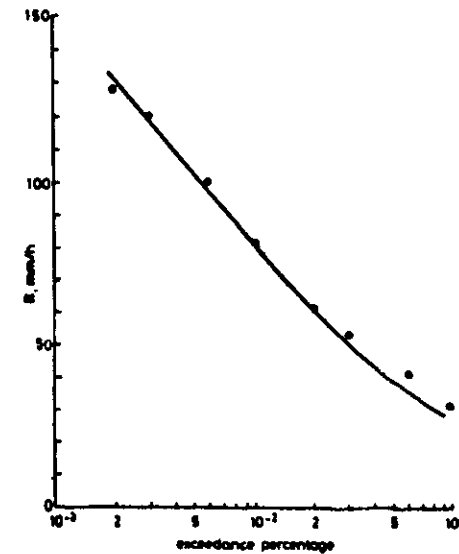


Fig. 11 Cumulative distribution of rainfall intensity in ASIA

— + — measured rainfall rates
— — — proposed empirical law
Calcutta—INDIA 2 years
 $R_{0.01} = 82$ mm/h

The interest of the model for the rainfall-rate distribution proposed here, resides in the fact that, in the absence of appropriate rainfall-intensity data for a certain location, using the CCIR contour maps of rainfall intensity exceeded for 0.01% of the time, one can determine the adequate cumulative distribution. Thus these CCIR maps giving $R_{0.01}$ (mm/h) are more convenient for the use of the present model than the CCIR rainfall climatic zone representation.

5 Conclusion

The probability law proposed here gives a good representation of intensity cumulative distributions for most of the hydrometeorological zones of the world classified by the

CCIR. It has a log-normal asymptotic behaviour for the low rain rates, and a gamma asymptotic behaviour for the high rain rates. To obtain a better world wide representation of rainfall distribution, an atlas of the parameter u values will, therefore, be proposed later.

Due to the interest raised by the precipitation effects, particularly those with high rainfall intensities for the design of terrestrial or satellite microwave radio links, it is necessary to have a simple and valuable mathematical model which can represent with good accuracy the whole distribution for values ranging from 2 mm/h to the tail of the distributions. The empirical model given by eqns. 1, 2 and 4 appears to be quite suitable for this purpose.

Because of the ever increasing importance of the radio systems, it is hoped that the above empirical model of rain distribution will be a useful tool for designers.

6 Acknowledgments

The author wishes to thank Professor A. Ochs of PTT Research Institute of Darmstadt (FRG) for helpful suggestions and discussions.

7 References

- 1 MOUPFOUMA, F.: 'Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical', *Ann. Télécommun.*, 1982, 37, (3-4), pp. 123-128
- 2 MOUPFOUMA, F., and DE REFFYE, J.: 'Empirical model for rainfall rate distribution', *Electron. Lett.*, 1982, 18, (11), pp. 460-461
- 3 CCIR XVII Plén. Ass. Geneva, 1982, V, report 563-2
- 4 MOUPFOUMA, F.: 'Two-parameter empirical model for rainfall rate distribution', *Electron. Lett.*, 1983, 19, (19), pp. 800-801
- 5 CCIR XVII Plén. Ass. Geneva, 1982, V, reports 338-4 and 564-2
- 6 LIN, S.H.: 'A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths', *Bell Syst. Tech. J.*, 1975, 54, (6), pp. 1051-1086
- 7 MORITA, K., and HIGUTI, J.: 'Prediction methods for rain attenuation distribution of micro and millimeter waves', *Rev. Electr. Commun. Lab. NTT*, 1976, 24, pp. 7-8
- 8 BOITHIAS, L.: 'On the statistical distribution of rain rate', *Ann. Télécommun.*, 1980, 35, pp. 9-10
- 9 SEGAL, B.: 'High-intensity rainfall statistics for Canada' CRC report 1329 E, 1979
- 10 FEDI, F.: 'A simple method for predicting attenuation statistics on terrestrial and earth-space paths', *Fondazione Ugo Bordini, report 18* 1081
- 11 Working-group 5-D doc 5-162 CCIR 1982-1986
- 12 TIFFON, J.: 'Etude de l'affaiblissement de propagation à 13 GHz dû aux précipitations tropicales', *Ann. Télécommun.*, 1981, 36, (5-6), pp. 245-261
- 13 KUMAR, P.N.: 'Precipitation fade statistics for 19.29 COMSTAR Beacon signals and 12 GHz radiometric measurements', COMSAT technical review 1982, 82, 223, 12, (1), pp. 1-27
- 14 FEDI, F. (Ed.): 'The Eurocop-COST 25.4 project on radio-propagation above 10 GHz', *Alta Freq. (Italy)*, April 1979
- 15 DE REFFYE, J.: 'Modélisation mathématique des intensités de pluie en un point du sol', *Rev. Ser. Appl.*, 1982, 30, pp. 39-63
- 16 C.C.I.R., 1978-82, DOC India

ore about rainfall rates and their prediction for dio systems engineering

Iouptouma, Dr Eng

ing terms: Radio-wave propagation (microwave), Telecommunications

ARTICLE 3

Abstract: Owing to the interest raised by the effect of precipitation on the design of satellite or terrestrial radiocommunication systems at high frequencies, it is important to have at our disposal a mathematical or semiempirical model which correctly accounts for rainfall rate cumulative distributions whatever the climatic region. In the paper an empirical model is suggested, based on two parameters: the rain rate value $R_{0.01}$ (mm/h) in the considered location, and a parameter which depends on the geographical characteristics of this location. This model allows the calculation of instantaneous rain rate cumulative distributions, depending on the use of CCIR hydrometeorological zones, or CCIR contours of rainfall intensities exceeded for 0.01% of the time: $R_{0.01}$ (mm/h).

Introduction

rainfall rate cumulative studies have grown in significance because of the increasing use of high frequency microwave systems. For many years, PTT administrations as well as specialised services equipped their communication networks (terrestrial and satellite) with microwave systems using frequencies below 10 GHz. At such frequencies wavelengths are larger than drop size, so rain does not figure among the phenomena which give rise to bad microwave propagation conditions.

During the late 1960s and especially in the mid-1970s, attention was focused, during various international conferences or meetings on microwave communications, on the problem of saturation of the frequency bands, particularly in developed countries, and it was found necessary to use higher frequencies. The World Administrative Conference of Radiocommunications (WARC) on frequency sharing, which was held in Geneva in 1979, involved developed as well as developing countries to re-use frequencies in order to plan their future radiocommunication networks which were to use wideband microwave systems.

Unfortunately, as higher frequencies are used, rainfall becomes a serious source of attenuation for microwave communications. As frequency increases, wavelength approaches the size of raindrops, which therefore act as a

screen of scatterers for the wave. Rainfall occurring over the links affects transmission quality and thus limits the system's performance. This phenomenon is even more critical in areas where the rainfall is very high, namely tropical, and more specifically in equatorial regions.

One of the difficulties one has to face when studying the feasibility of a terrestrial or satellite microwave link is obtaining the rain rate statistics for the area being considered to estimate the percentage of time (within an average year) during which absorption and scattering phenomena are significant and, consequently, the rain induced outage for the same period.

Unfortunately the required rainfall data are not available for any of the chosen hydrometeorological areas. Therefore, CCIR [1] has developed two world wide maps: one with contours of rainfall intensity exceeded for 0.01% of the time, the other with isopleths of rainfall intensity exceeded for various percentages of time within the interval from 0.001% to 1%, and dividing the world into several hydrometeorological zones.

The knowledge of rain rate values exceeded for 0.01% of the time is very important. However, it is obviously also necessary to know rainfall intensity exceeded for other percentages of time, because knowledge of the rain rate cumulative distribution for the whole range of useful time percentages allows a better determination of the rain attenuation. Thus, there is an important need for a mathematical or semiempirical model which correctly accounts for rainfall rate cumulative distributions whatever the climatic region. We describe a semiempirical (but theoretically sound) model which allows the calculation of instantaneous rain rate cumulative distributions, depending on the use of CCIR hydrometeorological zones, or CCIR contours of rainfall intensities exceeded for 0.01% of the time.

2 Rainfall structure

2.1 Types of rainfall

Generally, meteorologists classify rains into two groups: convective rains and stratiform rains, which in turn are related to various cloud families. This classification is based on the mechanisms which prompt cooling, condensation and associated rain. Nevertheless, precipitation occurs in clouds not cooled down to the freezing point, through the process of coalescence.

Convective rains, including local storms and strong showers, occur when updrafts (hot and moist air) become, locally, sufficiently powerful (about 100 km/h) and give rise to cumulo-nimbus clouds. The raindrops which form at the same time at the bottom of the cloud are transported by the updrafts up to an altitude where their concentration increases relatively quickly (over about 15-20 min) and then fall back to the ground due to violent

This paper has, in part, been submitted at URSI Commission F open symposium on Propagation Remote sensing and communication July-August 1986, University of Durham, New Hampshire, USA.

or 5678H (E11), first received 30th October 1986 and in revised form 18th June 1987.

The author is with Centre National d'Études des Télécommunications, 40 rue de Général Leclerc, 92131 Issy les Moulineaux, France.

down drafts. As a result of atmospheric instability due to heat and moisture, thunderstorms are more frequent in equatorial areas than elsewhere. Moreover, they are sometimes followed by strong showers due to squall lines.

In stratiform rains, the updrafts that maintain clouds are so weak that rain particles which form at the cloud top slowly gather and descend while increasing in size. The concept of stratiform precipitation is often used to describe rains in non tropical regions.

2.2 Variability of rainfall

Rainfall is one of the most variable elements of weather. It varies in intensity, duration, frequency, and spatial pattern. The highest rainfall intensities, those of convective precipitations are of short duration, and the medium or low rainfall intensities of stratiform precipitations have longer duration. Rainfall intensity is therefore an inverse function of its duration and can vary considerably with duration from one region to another or from storm to storm.

As we will see later, geographical features, such as the presence of mountains, hills or water masses (oceans, great lakes, etc.), influence the nearby climatology. Rainfall is intensified or increased in duration as moist air streams approach the crest lines of hill or mountain ranges, its patterns being complicated locally by the effects of spurs, valleys, and other terrain features. It is often ignored that liquid water present in clouds acts on microwave systems. This water which cannot be measured at ground level since its drops are too small and air stagnant, introduces, on a relatively long high-frequency radio path, some errors in the computation of the rain attenuation, which may thus depart significantly from the measured data at high time percentages.

3 Parameterisation of rainfall rate as a function of duration

When analysing rainfall rate data for propagation studies, one has on the one hand parameters R (mm/h) and T (hours), representing respectively the rain rate and the total duration of the propagation experiment, and on the other hand parameters r and P such that r represents the total time during the experiment for which the rain rate R is exceeded, and P represents this time as a percentage of the total duration of the test (T); i.e.

$$r = \sum_{i=1}^N \delta_{R_i} \quad (1)$$

$$P(\%) = \frac{r}{T} \times 100 \quad (2)$$

Using Table 1, which gives rainfall rate cumulative distributions for regions representative both of temperate and tropical climatic zones [2, 3, 18], it appears that rain rates and their corresponding time percentages of exceedance may be roughly related through the following non linear relationship:

$$R(\text{mm/h}) = \frac{q}{P(\%)^v} \quad (3)$$

3.1 Behaviour of parameters q and v according to climatic zones

In the following, we only consider the percentage of time $P(\%)$ in a year for a given precipitation rate R (mm/h) to be exceeded. Using the data of Table 1, values of para-

Table 1: Rain rate cumulative distribution in some tropical and temperate locations

Time percentage	10 ⁻²	3	10 ⁻³	3	10 ⁻¹
Duration, min	6	16	53	168	526
Rain climatic zones					
Temperate zones					
Austin (USA)	116	85	64	38	18
Blackburg (USA)	104	74	43	21	8
Clayton (Australia)	111.6	82.8	64	35.5	16.6
Darmstadt (D)	60	38	22	12	5.5
Gometz (France)	54	36	21	11.5	6
Kirkkonummi (FLN)	64	37.8	23	13	6.4
Lario (Italy)	117	84	62	27.6	12.6
Loenheim (D)	63	38.1	33	17.8	7.4
Mendlesham (UK)	50	32	18	10	4.6
Nederhorst (HOL)	66	47	30	17.2	8
Paris (France)	60	36	33	17	8
Tropical zones					
Belém (Brazil)	180	180	100	78	40
Danang (Vietnam)	150	125	90	64	40
Darwin (Australia)	218	178	130	86	48
Innisfail (Australia)	228	189	142	107	70
Djatiluhur (Indonesia)	182.8	138.5	109.2	79.2	51
Korhogo (Ivory Coast)	222	172	122	80	66
Manaus (Brazil)	140	130	88	66	40
PK 45 (Congo)	183	148	106	70	38
Saigon (Vietnam)	186	150	110	70	38

meter q and v which can verify eqn. 3 are

(a) Temperate zones

Locations	q	v
Austin (USA)	7.04	0.42
Blackburg (USA)	2.71	0.56
Clayton (Australia)	5.17	0.48
Darmstadt (FRG)	2.12	0.49
Gometz (France)	2.17	0.47
Kirkkonummi (FLN)	2.07	0.52
Lario (Italy)	3.68	0.53
Loenheim (FRG)	2.5	0.54
Mendlesham (UK)	1.48	0.53
Nederhorst (HOL)	3.23	0.45
Paris (France)	2.59	0.53

(b) Tropical zones

Locations	q	v
Belém (Brazil)	20.9	0.33
Danang (Vietnam)	22.3	0.30
Darwin (Australia)	26.32	0.32
Innisfail (Australia)	33.53	0.30
Djatiluhur (Indonesia)	31.35	0.25
Korhogo (Ivory Coast)	29.8	0.30
Manaus (Brazil)	21.5	0.30
PK 45 (Congo)	18.25	0.35
Saigon (Vietnam)	18.12	0.35

Inspection of these results shows that parameter q has higher values in tropical climatic zones than in temperate zones. Moreover these values vary quite considerably from one location to another in the same climatic zone. As far as parameter v is concerned, its values are different for the two categories of zone, and that these values can be represented by their mean value, which is 0.50 for temperate zones, and 0.31 for tropical zones with a standard deviation value of about 10% of the mean. This accuracy is related to the error of rainfall rate measurements, and v is obviously a climate dependent parameter. So, as pointed out in Table 2, it may be concluded that in temperate zones, rainfall rate is approximately proportional to the reciprocal of the square root of time percentage, while in tropical zones it is roughly proportional to the inverse cubic root of the time percentage.

Table 2: Behaviour of rain rate according to the climate

Temperate zones	R (mm/h)	$\propto \frac{1}{\sqrt{P(\%)}}$
Tropical zones	R (mm/h)	$\propto \frac{1}{\sqrt[3]{P(\%)}}$

Parameter v has smaller values in tropical zones than in temperate zones, because in the first case precipitations are due to squall lines and convection rains, which give rise to high rainfall intensities, already mentioned as having a short duration. In the second case rainfall intensities are due to stratiform precipitations, which are of long duration.

A thorough study of parameter q should take into consideration the local rain characteristics: Size of rain cells, type of clouds and rains, etc. Moreover, the knowledge of a mathematical relationship giving parameter q according to climates could allow a rain rate cumulative prediction law to be determined. However this study of parameter q is out of the scope of this paper, and we will study the prediction of rain rate cumulative distribution in another way.

4 Measurement of rainfall rate data

To obtain rainfall rate data in a place where radiocommunication systems have to be implemented, one can

(a) use the data collected during many years in various places by national meteorological administrations. However the aim of these administrations is not to study radiowave propagation, and the integration time they use for collecting their data is too long (1 h or even 24 h) for the radio system designs, and unfortunately conversion laws which allow determination of instantaneous rain rates from rain rates with a given integration time cannot be safely used.

(b) carry out rainfall rate measurements by means of rain gauges with small resolution time (from a few seconds to 6 minutes). These allow the instantaneous local rainfall rate to be determined and therefore well suited for radio engineering. The use of several spaced rain gauges allows the spatial extent of the rain and the cell sizes to be accounted for. Moreover, the longer the duration of such data collecting, the more significant the results are. The use of radar or satellite measurements, which are expensive techniques, allows more information on the rain structure (rain cells etc.) to be gathered, but rainfall intensities derived from such measurements are not accurate enough for radio system designers.

5 Estimations of instantaneous rain rates

As pointed out in the introduction, CCIR has developed, in its report 563-3, two world wide maps, one with contours of rainfall intensity exceeded for 0.01% of the time $R_{0.01}$ (mm/h), another giving rain climatic zones which divide the world into several areas of unequal rainfall intensities [1]. Contours of $R_{0.01}$ (mm/h) are well defined, mainly for temperate zones, but unfortunately they are incomplete, and isopleths for other percentages of time are useful. CCIR rain climatic zones cover almost all the world, however, they are not precise enough. It is necessary to have a mathematical or empirical model which correctly models rain rate cumulative distributions whatever the climatic zone.

Many prediction models have been proposed [4 to 7], in particular the log-normal and the gamma laws, the Rice-Holmberg model and that of Dutton and Dougherty. The first two are well known. Log normal is appropriate for low and medium rainfall rates, while the gamma model gives a good representation of medium and high rain rates. However, none of them is globally applicable to different hydrometeorological zones. These asymptotical distributions merge at about 20 to 50 mm/h (depending on the climate), which is sometimes troublesome for applications, since it corresponds to a value which is of a great importance [8].

The analysis of rainfall rate data collected during a radio wave propagation experiment, which lasted more than two years, in Brazzaville (Congo) led the author to propose an experimental probability law which allows us to represent all rainfall cumulative distributions by a single function in the whole range of useful values. If rainfall rate values greater than 2 mm/h are considered, this function has the following form [8]

$$P(R \geq r) = a \frac{e^{-u}}{r^b} \quad r \geq 2 \text{ mm/h} \quad (4)$$

with parameters a , b , u depending on the integration time of the rain gauges used as well as on the geographical characteristics of the locality of interest.

$F(r)$ being the distribution function which characterizes the random variable r (mm/h) as

$$F(r) = P(R < r) = 1 - P(R \geq r) \quad (5)$$

the probability density associated with eq. 4 is

$$f(r) = \frac{dF}{dr} = \begin{cases} \frac{a}{r^b} \left(u + \frac{b}{r} \right) \exp(-ur) & r(\text{mm/h}) > 0 \\ 0 & r(\text{mm/h}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Since $F(+\infty) = 1$, u is always positive, and b can be restricted to positive values. Moreover $P(R \geq r)$ must be smaller or equal to 1. This condition is not generally true since $P(R \geq r)$ takes an infinite value when r is zero. However, if we assume that in practice $r \geq 2$ mm/h, the condition is in fact always satisfied with $0 < a < 1$ as shown in Reference 9.

6 Evaluation of parameters of the model

In a previous paper [10], using rainfall data from a number of hydrometeorological zones, the author has shown that parameters a and b in eqn. 4 are related to the rainfall intensity $R_{0.01}$ (mm/h) exceeded for 0.01% of the time for any integration time as follows

$$a = 10^{-4} R_{0.01}^b \exp(u R_{0.01}) \quad (7)$$

$$b = 8.22 R_{0.01}^{-0.384} \quad (8)$$

Eqn. 4 may then be written as

$$P(R \geq r) = 10^{-4} \left(\frac{R_{0.01}}{r} \right)^b e^{u R_{0.01} (1 - \frac{r}{R_{0.01}})} \quad (9)$$

The model then becomes dependent on

(a) $R_{0.01}$ (mm/h) which accounts for the shape of the distribution

(b) u which describes the slope of the curve

When both these parameters are known, eqn. 9 gives rainfall cumulative distributions for any locality. The use of $R_{0.01}$ as a parameter in our model is helpful since its

values are known with great precision from the CCIR programme [1]. Fitting of data shows that for $u = 2.5 \times 10^{-3}$, the model gives a good representation of instantaneous rainfall rate for a great number of localities across the world [10]. However, in some countries, such as Japan, climatic and geographical features (mountains, great extents of water, etc) prevent the use of this value of parameter u . To have a better fit of rain cumulative distributions from as many localities across the world as possible, we propose two variants of the above model, the first with u as a function of rain rate, and the second one with u expressed by a pair of values (u_1, u_2). For the first variant, u is derived from the cumulative distribution representing the CCIR rain climatic zones. For the second variant of the method, the couple of values (u_1, u_2) is calculated from data collected in 162 localities across the world.

6.1 First variant of the method: rain climatic zone dependent parameter u

Let us analyse the rain climatic zones proposed by CCIR (Table 3). Their inspection shows that only zones D to P are of interest for rain studies, since zones A, B, and C are scarcely rainy, being either desert or covered with ice. Moreover, most of the available experimental rain data in the CCIR database or in the literature have been gathered in places located within this first group of zones [2, 3], [7 to 24]. Nevertheless using the rain distributions characterising those zones, we noticed that they did not give a good fit when using a constant value of parameter u in the formulas. To improve the model, we considered u as a function of the rain rate, and expressed it as:

$$u = \lambda r^{-s} \quad (10)$$

Table 3: CCIR rain climatic zones [1]: rainfall intensity averaged (mm/h)

Percentage of time	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1.0	—	1	—	3	1	2	—	—	—	2	—	4	8	12
0.3	—	1	2	3	8	3	4	7	4	13	8	7	11	34
0.1	—	2	3	5	8	8	8	12	10	20	12	18	22	66
0.03	—	6	8	9	13	12	16	20	18	28	23	33	40	108
0.01	—	8	12	16	19	22	28	30	32	38	42	60	83	146
0.003	—	14	21	28	29	41	54	45	56	48	70	108	86	200
0.001	—	22	32	42	42	70	78	66	83	56	100	180	120	260

where λ and s are parameters derived, for each climatic zone, from data of Table 3 and are listed in Table 4, and r (mm/h) is the rain rate characterising a given zone.

Table 4: Values of parameters λ and s according to climatic zones

	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
λ	0.18	0.08	0.07	0.14	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.033	0.038
s	0.33	0.29	0.32	0.28	0.18	0.18	0.17	0.22	0.09	0.08	0.1

As an example, suitable values of u calculated for CCIR climatic zone L from eqn. 9 and listed in Table 5 are approximated for CCIR climatic zone L by:

$$u = 0.05r^{-0.33} \quad (11)$$

Table 5: Parameter u values versus rain rate in CCIR climatic zone L

R (mm/h)	150	106	80	33	17	7
u	0.017	0.0174	0.022	0.024	0.027	0.032

Substituting eqn. 10 in eqn. 9 then

$$P(R > r) = 10^{-4} \left(\frac{R_{0.01}}{r} \right)^s \exp \left(\lambda r^{-1-s} \left(\frac{R_{0.01}}{r} - 1 \right) \right) \quad (12)$$

$$b = 8.22R_{0.01}^{-0.334}$$

Thus provided that the correct CCIR climatic zone has been chosen, and that $R_{0.01}$ (mm/h) for the locality concerned is known, the rainfall rate cumulative distribution

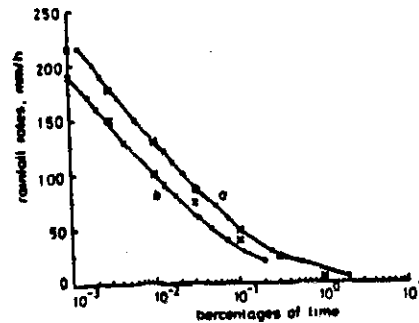


Fig. 1 Comparison between measured and predicted rain data in Darwin (Australia) and Belém (Brazil)

may be predicted from eqn. 12 and Table 4. Fig. 1 shows a comparison between predicted results with experimental data gathered in Belém (Brazil) and Darwin (Australia) which belong in the CCIR zone P, while Fig. 2

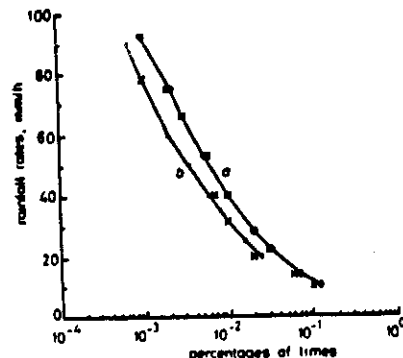


Fig. 2 Comparison between measured and predicted rain data in Dijon (France) and Madrid (Spain)

• Dijon • measured $\lambda = 0.06; s = 0.19$
• Madrid • measured $\lambda = 0.06; s = 0.19$

relates to Dijon (France) and Madrid (Spain) which are located within zone H. A good agreement is achieved as shown in the two figures.

CCIR rain climatic zones cover nearly all the world; unfortunately they seem to be too roughly determined for local climatic effects in some regions necessarily to be taken into account. So the model given by eqn. 12 might not provide an accurate representation of rain rate whatever the locality. To take into account the influence of geographical features on nearby climatology, we propose a second variant of the method given by eqn. 9, now using values of parameter u calculated from data collected at 162 sites of which 4 are in Africa, 60 in America, 30 in Asia, 27 in Australia, 40 in Europe and 1 in the Middle East. Since for time percentages (P) less than 0.001% rainfall intensities are very high and affected by substantial errors and at over 1% of the time, attenuations observed on radio links are no longer related to rain rates, we have calculated the values of parameter u for rain rates corresponding to time percentages ranging from 1% to 0.001% [18].

6.2 Second method: two value parameter u

When evaluating parameter u , we noticed that for certain localities, due to geographical nonuniformity, such as the presence of mountains or great extents of water (oceans, lakes ...), the rainfall cumulative distribution could not satisfactorily be approximated by the proposed model given in eqn. 9, unless two distinct values u_1 and u_2 were attributed to parameter u , the first one corresponding to high rainfall intensities, and the second to medium and low rainfall intensities. In order to unify the presentation of our model we therefore assume that parameter u has everywhere two values, which may be equal for some localities. Moreover, analysis of rain data from the above mentioned sites shows that a change in the slope of the curve obtained with our model must be introduced at rain rates values corresponding to about 0.01% of time. Thus parameter u which describes this slope becomes:

$$u = \begin{cases} u_1 & \text{for } P(\%) \leq 0.01 \\ u_2 & \text{for } P(\%) > 0.01 \end{cases} \quad (13)$$

such that u_1 provides the model given in eqn. 9 and 13 with a good gamma asymptotical behaviour, while with u_2 the proposed model behaves like a log-normal model. All things considered, this second variant of the rain cumulative distribution model is described with a couple of values (u_1, u_2). Thus we proposed an atlas of parameter u values covering as many as possible the world zones for which rainfall rate data are available [18, 24]. This atlas and the CCIR isopleths of $R_{0.01}$ (mm/h) associated with the prediction method given by eqns. 9 and 13 may be useful for project engineers. Behaviour of (u_1, u_2) values is dependent on climate and geographical environment.

6.2.1 Africa

A large part of Africa is characterised by a humid tropical climate with frequent high rains, particularly between 10° south and 10° north, namely Ile-Ile (Nigeria) [23], Kothogo (Ivory Coast) [18], Brazzaville and PK-45 (Congo) [8, 10].

6.2.2 America

(a) Canada: In Canada, Segal undertook an analysis of rainfall rate data collected during many years in 47 stations, most of which are in the southern part of the

country. His results are given as curves of rainfall intensity distribution [7]. For our study, we only selected data from 34 stations, such that the distribution curve is a continuous curve and the distribution gives the $R_{0.01}$ (mm/h) value which is essential for our rain rate prediction model.

To emphasise the influence of maritime climates on the rain, data from sites located in the south east of the Atlantic Ocean coast and in the south west in the vicinity of the Pacific Ocean coast, as well as data gathered around Hudson Bay, were analysed. From the results, the measurement sites can be classified into two categories, namely those located inland, or continental sites, and those near the coast, or coastal sites. Both can be classified as a function of their common values (u_1, u_2) of parameter u . As an example, let us classify some Canadian localities.

(i) Continental sites

$u = (0.02, 0.02)$

London Ont.
Montreal Que.
North Bay Ont.
Ottawa Ont.
Toronto Ont.
Windsor Ont.

(ii) Coastal sites (sites located on islands)

$u = (0.05, 0.05)$

Comox B.C.
Stephenville NFLD
Sydney NS

From the above list it is clear that parameter u takes higher values on the coasts than at continental sites.

(b) United States of America: The evaluation of parameter u for the USA has been carried out from data collected in 25 measurement sites (Table 7) over a long period of time [1, 3, 11, 19, 20, 24]. As we did for Canada, we compared the values of parameter u in some inland and coastal localities with that in the vicinity of large water areas. According to the above results, it is clear that u takes higher values in coastal areas or near large masses of water, such as Lake Erie, in Buffalo (NY).

(i) Inland localities

$u = (0.02, 0.03)$

Blacksburg (Virginia)
Holmdel (New Jersey)
Palmetto (Georgia)

(ii) Localities near an extent of water

$u = (0.045, 0.045)$
Buffalo (New York)
Waltham (Massachusetts)

(c) Southern America: As for most of the developing countries, available propagation information from Southern America is scarce. The only rainfall data we obtained were gathered at Rio de Janeiro and Belém, in Brazil [3].

6.2.3 Australia

Australia is in itself a continent. Its northern part has a tropical climate, while a temperate climate prevails in the eastern and southern parts. In the interior, in addition to the presence of mountains, a dry desertic climate prevails. Effects of rainfall on radio systems in these various climatic zones were investigated by R.K. Flavin [12]. The rain data he used were collected by the Australian Bureau of Meteorology throughout a period of over 15 years. Flavin derived for an integration time of 6 minutes,

Table 7: Classification of parameter u values

class	(u_1, u_2)	Africa	America	Asia	Europe	Australia
1	$(1.5 \times 10^{-2}, 1.8 \times 10^{-2})$		Canada Edmonton Alt. Prince Albert Sask. Regina Sask. Swift Current Sask. Uranium City Sask. Val d'or Que. Winnipeg Man.			
2	$(2 \times 10^{-2}, 2 \times 10^{-2})$		Canada London Ont. Montreal Que. North Bay Ont. Ottawa Ont. Toronto Ont. Windsor Ont. USA Blairmont ND Canada Congo Brazzaville P.K. 45	Singapore Singapore	Central Europe Bercenay-en-Othe F. Dortmund D. Jungfrau S. Louvain S. Mantelsham UK Mendlesham UK Munich D. Paris F. Bern S.	
3	$(2.5 \times 10^{-2}, 2.5 \times 10^{-2})$		USA Blacksburg VA Clarkburg MA Dallas T. Hudson NH	Mediterranean Europe Athens Gr. Lario I. Rome I. Spino d'Adda I. Torino I. Barcelona Spain Madrid Spain		
4	$(2 \times 10^{-2}, 3 \times 10^{-2})$		USA Franklin NC Holmdel NJ Palmetto GA Brazil Belém	Vietnam Pleiku		Longreach Kirtleagh Weipa
5	$(3 \times 10^{-2}, 3 \times 10^{-2})$	Ivory Coast Korhogo Nigeria Ba Ibe	Canada Gander NFLD Halifax NS Kentville NS Mission BC St John's NFLD Vancouver BC USA Atlanta GI Columbia MO Columbus OH Greenbelt MA Milwaukee W. Newark NJ Urbana IL	Japan Tokyo Yokosuka India Calcutta Vietnam Demang Saigon	Central Europe Darmstadt D. Dijon F. Fort noire D. Freiburg D. Leiden D. Limoges F. Rennes F. La Rochelle F. Slough UK Toulouse F. Mediterranean Europe Fucino I. Lustbuehel Austria Northern Europe Arendal Kjetler N. Sodenkyia FNL.	Australia Balingup Bilola Bimbene Broome Brunette Charleville Clayton Dorrigo Mackay Morée Prairie Post Office Thursday Island Turkey Creek Wagga Watches
6	$(3.5 \times 10^{-2}, 3.5 \times 10^{-2})$		USA Austin Tx Lynchburg V. Mayaro Marshall Islands Memphis TN Miami FL New Orleans LA Brazil Rio de Janeiro	Japan Ogasawara Naha	Central Europe Koblenz D. Nederhorst Hol. Northern Europe Gardemoen Nor.	Adelaide Cairns Cooktown Innisfail Melbourne Orange (Roosters) South Moesman Sydney Warwick

class	(u_1, u_2)	Africa	America	Asia	Europe	Australia
7	$(4.10^{-2}, 5 \times 10^{-2})$			Japan Choshi Ibaraki Kamaui Kashima Kagoshima Kesennuma Mito Onshama Sendai Yokohama		
8	$(4.5 \times 10^{-2}, 4 \times 10^{-2})$		USA Buffalo NY Waltham MA Albuquerque NM	Japan Marugame Minamidaite Owase Sapporo Yamaguchi	Northern Europe Helsinki FNL Stockholm S.	Cameron airport
9	$(5 \times 10^{-2}, 5 \times 10^{-2})$		Canada Comox BC Stephenville NFLD Sydney NS	Japan Ashitayui Hamada Hiroshima Nase	Israel Bet Degan	
10	$(5.5 \times 10^{-2}, 5.5 \times 10^{-2})$			Ashara	Halden Nor Opsteveit Nor	

the rainfall rate cumulative distribution curves for 71 Australian towns. Using data recorded in some of these locations with fast response rain gauges, he established the following empirical relationship (eqn. 14), where R_6 (mm/h) and R_1 (mm/h) represent rainfall rates corresponding to integration times of 6 minutes and 1 minute respectively

$$R_1 = 0.99 R_6^{1.094} \text{ mm/h} \quad (14)$$

The error introduced by the preceding formula amount to no more than 10% for rain rates less than or equal to 75 mm/h. Above this threshold the relative error becomes greater [21]. We have calculated (u_1, u_2) values from rain rates obtained by means of the above conversion formula, with 6 minute rain rate values lower than 75 mm/h, i.e., 88% of the cumulative distributions calculated by Flavin (see Table 7).

6.2.4 Asia

Data used to study point rainfall rate distribution in Asia originate from Calcutta and Delhi in India [1, 18]; from Danang, Pleiku and Saigon, in Vietnam [3, 5]. For the most part though they come from 24 Japanese measurement localities [2, 6, 13] (Table 7).

Owing to its insular nature (1042 islands) and its hilly relief, Japan is subject to locally variable rain structure. In Sapporo and the northern island (Hokkaido), strong rains result from squall lines, whilst in Tokyo in Honshu (the largest of the islands) they are due to typhoons and thunderstorms. In the south of the country, monsoons are predominant. The different Japanese rain structures lead to rainfall rate distributions with two slopes. Values of (u_1, u_2) which govern these slopes strongly depend on ocean influence in coastal areas and islands, and are on average very close to those obtained at Canadian sites, such as Sydney (NS) and Comox (BC), or at American ones, such as Buffalo (NY).

6.2.5 Europe

Owing to the diversity of climates in Europe, the point rainfall rate data exhibit great variation, as evinced by

the results of the COST 205 project [17]. As data at our disposal for study originated from western European localities [1, 2, 16, 17, 22], by Europe we mean here only Denmark, Finland, Norway and Sweden by Northern Europe, Greece, Italy and Spain by Mediterranean Europe and Belgium, France, West Germany, Netherlands, United Kingdom and Switzerland by western central Europe.

Analysing the 40 European measurement sites (Table 7), it appears that the pair of values (u_1, u_2) is almost constant, from one locality to another, in western central Europe, while in the northern part important variations are clear. On the other hand, values of u obtained in some Norwegian localities, such as Halden and Opsteveit, are the same as those obtained in Japanese sites.

6.2.6 Study of the behaviour of (u_1, u_2)

Since the proposed model given by eqns. 9 and 13 is only dependent on parameter u and $R_{0.01}$ (mm/h), it seems important to estimate the accuracy Δu of this parameter u . Let ΔP be the root mean square deviation between values of P obtained by using eqns. 9, 13 and those which correspond to experimental data. Δu is then given by

$$\Delta u = \left| \frac{1}{(R_{0.01} - r)} \left(\frac{\Delta P}{P} + \left(\frac{b}{r} + u \right) \Delta r \right) \right| \quad (15)$$

All the localities for which the pair of values is such that

$$\begin{aligned} u_1 &\in [u_{01} - \Delta u_1, u_{01} + \Delta u_1] \\ u_2 &\in [u_{02} - \Delta u_2, u_{02} + \Delta u_2] \end{aligned} \quad (16)$$

may therefore be considered as characterised by the same pair of values (u_{01}, u_{02}) , which describe the contour curve in which they are located in the atlas we propose. Those pairs of values can then be classified in ascending order into ten classes, numbered from 1 to 10, as in Table 6. An inspection of Tables 6 and 7 leads to the following conclusions: Continental areas, being more favourable to convective rains, are characterised by low values of parameter u , with steeper slope distributions, and, local-

ities near extents of water or mountains, are characterised by high values of this parameter, with shallower slope distributions, because rainfall is mainly stratiform.

7 Atlas of parameter u values

Using the geographical coordinates of the various locations studied here, and their class number in Table 6, contour maps (Figs. 3 to 6) have been drawn for most of the regions of the world. For localities for which only a few rain data are available, Tables 1 and 7 give information about $R_{0.01}$ (mm/h) and (u_1, u_2) .

Table 6: Classification of parameter u values

Class	u_1	u_2
1	(0.018 0.015)	
2	(0.020 0.020)	
3	(0.025 0.025)	
4	(0.020 0.030)	
5	(0.030 0.030)	
6	(0.035 0.035)	
7	(0.040 0.060)	
8	(0.045 0.040)	
9	(0.050 0.050)	
10	(0.055 0.055)	

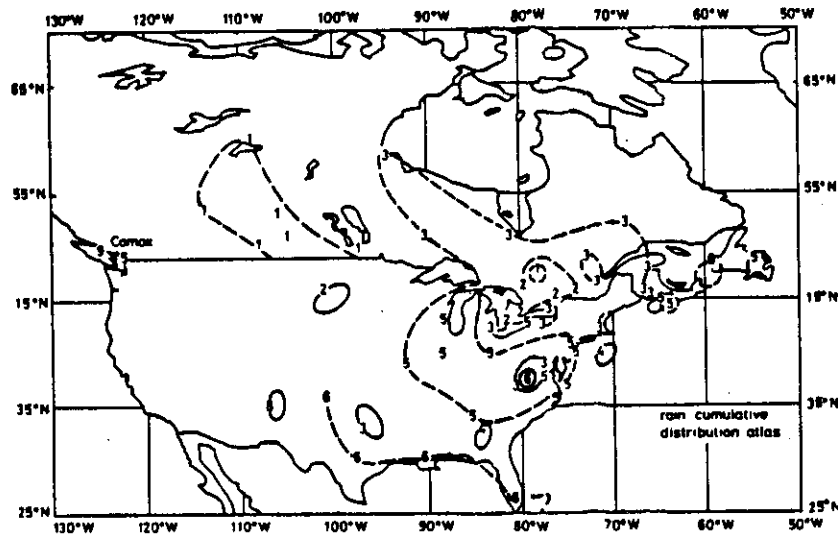


Fig. 3 North America

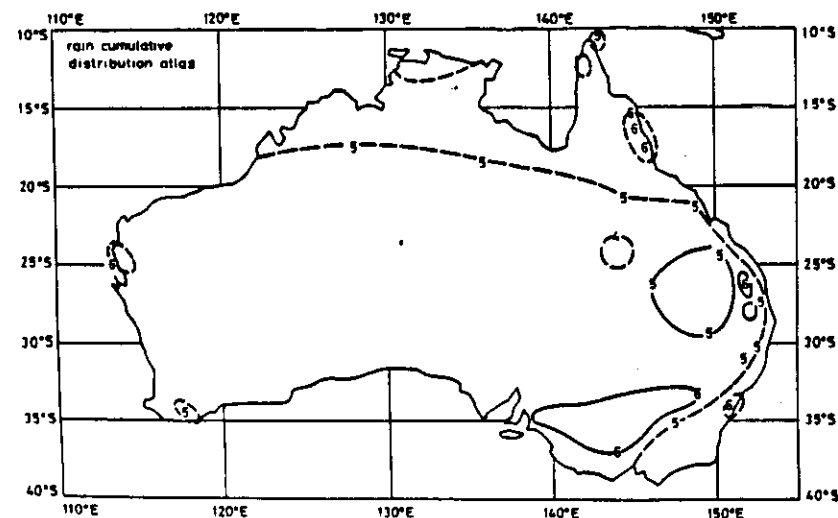


Fig. 4 Australia

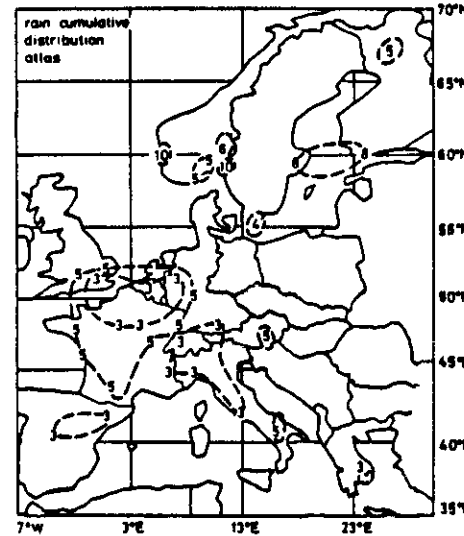


Fig. 5 Western Europe

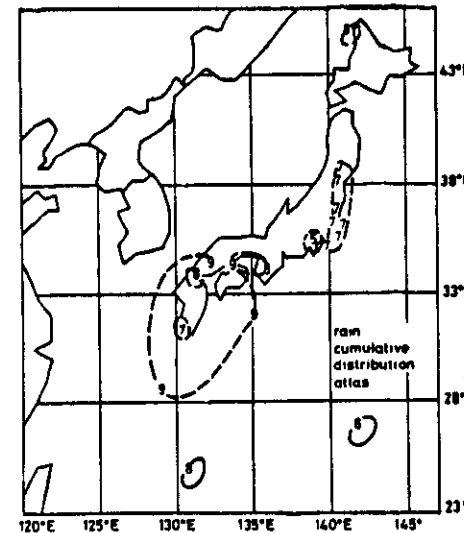


Fig. 6 Japan

As one can see in Fig. 7, using the rainfall distributions of Barcelona (Spain) [22], and Mendlesham (UK), and their corresponding values of (u_1, u_2) in the atlas, good agreement is achieved with the prediction method given by eqns. 9 and 13.

8 Choice of prediction method according to conditions

In Section 6, we showed that due to its flexibility, our empirical model is suited to the prediction of rainfall intensity, provided that $R_{0.01}$ (mm/h) is known.

According to whether CCIR rain climatic zones, or CCIR contours of rainfall intensities exceeded for 0.01% of time, are used, we proposed a way of deriving parameter u values to fit the proposed prediction model to the location of interest. Figs. 8 and 9 compare, for various localities representative of tropical and temperate climates, experimental data with approximate rain rate cumulative distributions obtained by using eqn. 12 with Table 5 and the alternative model proposed in both eqns. 9 and 13, together with the atlas of parameter u (Figs. 3 to 6 and Table 6). From these graphs, it seems that the second method leads to a good agreement whatever the region and the climate, while the first can be used satisfactorily provided that both the right CCIR rain zone has been chosen and that the location concerned is not subject to micro climates.

According to an overall picture of the world climatic situation, tropical climates are more uniform than temperate ones, which might explain why, in Table 3 (from CCIR) only zones N and P are necessary to represent all tropical climates, although temperate ones are represented by several different zones such as M, L, K, J, H, G, F, E etc. Nevertheless, more rainfall data from tropical regions should provide a better delimitation of CCIR tropical rain climatic zones.

Eventually, both the first and second variants of the model can safely be used. Nevertheless, for localities for which there are no more data (mainly tropical ones), the use of the first variant of the model, given by eqn. 12 and Table 4 is recommended, whilst in other cases — mainly in localities close to large extents of water or mountains, localities prone to micro climates — one has to use the second variant, given by eqns. 9 and 13 together with the atlas consisting of Figs. 3 to 6 and Table 6.

9 Limitations of the proposed law

Our prediction method relies on the values of parameters u and $R_{0.01}$ (mm/h). Its use suffers from some limitations due to two sources of errors:

(i) Statistical limits on data: compared to occurrences of medium rainfall rates, the number of the highest rainfall events (above 120 mm/h) is sometimes not significant. This generally leads to a steep change in the slope of the distribution curve, while on the other hand low rain rates present a high annual number of occurrences, but they offer little contribution to the determination of rain cumulative distribution.

(ii) Measurement errors: the accuracy of data is related to that of recorders. Leaves can block the rain gauge, sand or dust can accumulate in the gauge and can become mud in the buckets, disturbing their swinging motions, and so on. All these factors reduce measurement accuracy. Saturation of a rain gauge induces a bias to the measurements of high rain rates, and mechanical limitations reduce the accuracy of the measurements. Also, the lack of sensitivity of some rain gauges leads to errors in low rain rates. These errors of the collected data of course have an effect on the evaluation of parameter u .

10 Conclusion

Rainfall rate data are needed for the design of radiocommunication systems. In this paper, two variants of an empirical model allowing the calculation of 1 minute point rain rate cumulative distribution are proposed.

(i) $R_{0.01}$ (mm/h) represents the rainfall exceeded for 0.01% of the time in the considered location, and may be

obtained by using CCIR contour curves. It describes the shape of the cumulative distribution.

(ii) Parameter u characterises the slope of this cumulative distribution, and its values can be obtained in two different ways:

(a) $u = (u_1, u_2)$. These pairs of values are classified into ten classes, numbered from 1 to 10. An atlas of these values is proposed in Figs 3 to 6, with contours, referenced by the number of each class, listed in Table 6.

(b) $u = \lambda r^{-s}$, where λ and s are parameters, the values of which depend on CCIR climatic zones, since $r(P)$ (mm/h) is the rain rate exceeded for $P(\%)$ of the time.

Figs. 1 and 2 and 7 to 9 show that both of the proposed variants of our method give good results in many climatic zones. Nevertheless, eqn. 12 and Table 4 are recommended provided that the zone to which the site of interest belongs is well known.

For islands, or cities located in the vicinity of large masses of water such as oceans, great lakes, large rivers or hilly regions, the use of eqns. 9 and 13 along with the proposed atlas of (u_1, u_2) values should give better results.

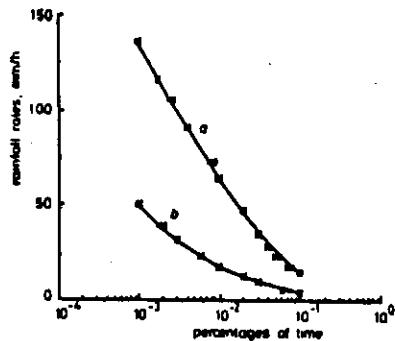


Fig. 7 Comparison between measured and predicted rain data in Barcelona (Spain) and Mendeleyevsk (U.K.)

Barcelona — measured
— $u = (0.23, 0.025)$
Mendeleyevsk — measured
— $u = (0.025, 0.025)$

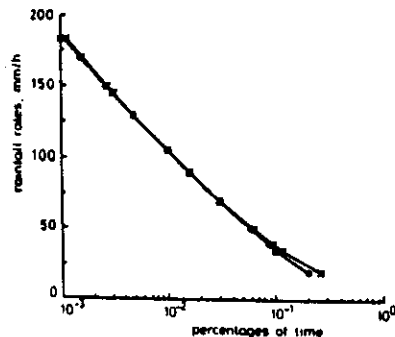


Fig. 8 Comparison between measured and predicted rain data obtained from the two variants of the model at PK-45 (Congo)

PK-45 (Congo) — measured
— $u = (0.025, 0.025)$
— $\lambda = 0.033, s = 0.06$

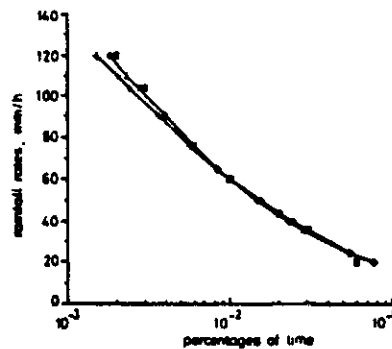


Fig. 9 Comparison between measured and predicted rain data obtained from the two variants of the model in Holmdel (USA)

Holmdel — measured
— $u = (0.02, 0.03)$
— $\lambda = 0.02, s = 0.17$

11 Acknowledgments

The author is grateful to Dr. David V. Rogers of Comsat Laboratories (USA), Dr. John Cavanagh of NSWG (USA) and Dr. Julius Goldhirsh of Johns Hopkins University (USA) for their help in obtaining some rain rates data for the western USA. Many thanks are also directed to Pr. J.P. Mon of University of Paris-Nord (France) for help in the preparation of this paper.

12 References

- CCIR, XVIIth plen. Ass. Dubrovnik, 1984-V, Report 543-3
- CCIR CES, Doc. 3/3 78 F, Genève, 1985
- 'Refractivity and rainfall data for radio systems engineering'. Report no. OTR 76-105 Office of Telecom. Boulder, Colorado, USA, September 1976
- RICE, P.L. and HOLMBERG, N.R.: 'Cumulative time statistics of surface point rainfall rates', *IEEE Trans.*, 1973, COM 21, pp. 1131-1134
- DUTTON, E.J., DOUGHERTY, H.T. and MARTIN, R.F. Jr.: 'Prediction of European rainfall and link performance coefficients at 8 to 30 GHz', *Inst. Telecomm. Sci.*, US Dep. Commerce, 1974
- MORTA, K.: 'Study on rain rate distribution', *Review of the Electromagnetic Laboratories*, 1978, 26, pp. 268-277
- SEGAL, B.: 'High intensity rainfall statistics for Canada', *Commun. Res. Can. Commun.*, Ottawa, Canada, November 1979
- MOUPFOUMA, F.: 'Distribution statistique des intensités de pluie et des affaiblissements dus à la pluie en climat équatorial et tropical', *Ann. Télécomm.*, 1982, 37, pp. 123-128
- MOUPFOUMA, F. and DE REFFYE, J.: 'Model for rainfall rate distribution', *Electron. Lett.*, 1982, 18, (11), pp. 460-461
- MOUPFOUMA, F.: 'Model of rainfall rate distribution for system design', *IEEE Proc. H*, 1983, 132, (1), pp. 39-41
- GOLDHIRSH, J.: 'Predictive methods for rain attenuation using radar and in situ measurements tested against the 28 GHz Comstar Beacon Signal', *IEEE Trans.*, 1979, AP-27, pp. 396-400
- FLAVIN, R.K.: 'Earth-space Path rain Margins above 10 GHz in Australia', *Research Laboratories Report 735E*, Telecom. Australia
- KURUHARA, H., YAMADA, M., SABA, N., OGAWA, A., YUKI, H. and FURUTA, O.: 'Degradation of cross polarization discrimination due to rain. On earth space at low elevation angle', *Trans. Inst. Electron. & Commun. Engrs., Part B*, 1978, 61, pp. 858-863
- YASUKAWA, K. and YAMADA, M.: '11 GHz rain attenuation and site diversity effect at low elevation angles', *URSI XXth General Assembly*, Washington DC, 1981
- DAUTRICHE, M.: 'Etude de l'affaiblissement et de la dépolarisation des ondes radioélectriques à 11.573 GHz sur un trajet terre-satellite', *Thèse CNAM*, Paris, Septembre 1985
- ROORYCK, M. and JUY, M.: 'Prévision de l'affaiblissement de la pluie sur les liaisons horizon de la France continentale', *Nota Technique NT/PAB/ETR/701*, 1985

- Project COST 205: 'Prediction of rain attenuation statistics from point rainfall intensity data', *Atm. Phys.*, 1985, 3, pp. 140-156
- MOUPFOUMA, F.: 'Atlas mondial des intensités de pluie intégrées sur une minute pour les études de faisabilité de liaisons horizontales et par satellite', *Nota Technique NT/LAB/MER/219-NT/PAB/RPE/49*, 1984
- LIN, S.H.: 'Nation wide long-term rain rate statistics and empirical calculation of 11 GHz microwave rain attenuation', *Bell Syst. Tech. J.*, 1977, 56, pp. 1581-1604
- HOGG, D.C. and TA-SHING CHU: 'The role of rainfall satellite communications', *Proc. IEE*, 1975, 63, (9), pp. 1038-1037
- FLAVIN, R.K.: 'Rain attenuation considerations for satellite paths in Australia', *Australian Telecommunication Research Lab. Report 7305*, 1982

- JUAN ANTONIO GARCIA LOPEZ, Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Tec. Sup. de Ingenieros de Telecom. Spain, 1986
- OLALERE AJAYI, G.: 'Statistical properties of tropical rainfall intensity measured in Nigeria for microwave applications', *Ann. Télécomm.*, 1982, 37, pp. 477-483
- MOUPFOUMA, F.: 'Empirical model of rainfall rates for microwave attenuation prediction in various hydrometeorological zones', *URSI (Com. F) Open symposium on Propagation, Remote sensing and Communication*, University of Durham, New H. USA, July 28th-Aug 1st, 1984, pp. 9.6.1-9.6.4

ANNEXE 6

ANNEXE 6

ETUDE DES CARACTERISTIQUES DES PRECIPITATIONS A DOUALA

I-Description de l'expérience

Dans le but d'avoir une bonne connaissance des caractéristiques de la propagation des ondes hertziennes dans les régions tropicales d'Afrique, l'Union Internationale des Télécommunications a pris l'initiative d'organiser une campagne de collecte de données à Douala (Cameroun) et à Brazzaville (Congo) avec le concours des administrations française et britannique des Télécommunications et la participation des administrations locales des PTT.

Conduit par le Centre National d'Etudes des Télécommunications avec la collaboration du Rutherford Appleton Laboratory, la campagne de mesures à Douala consiste en l'étude des caractéristiques des précipitations et de leurs effets sur les liaisons hertziennes.

En plus de ces mesures, le CNET entreprend à Brazzaville la collecte des données sur les caractéristiques du vent.

Cette campagne qui fait suite à la résolution n° 5 adoptée lors de la Conférence Administrative Mondiale des Radiocommunications en 1979 à Genève, et à sa résolution n° 68 avait été programmée lors du séminaire de Lomé (Togo) en 1983 consacrée à la propagation en région tropicale.

Ce chapitre ne concerne que l'étude entreprise à Douala et nous analyserons ici les résultats obtenus durant les cinq premiers mois de mesures.

II-Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques de la campagne sont essentiellement :

- L'étude de la structure de la pluie (dimension des cellules).
- L'étude de la distribution cumulative des intensités de pluie.

III-Description des systèmes expérimentaux

Les systèmes expérimentaux utilisés avaient pour principes:

- la collecte des données
- leur pré-traitement sur le site

- leur stockage en attendant leur prélèvement, ou mieux encore leur transmission par des moyens classiques (liaison téléphonique, liaison HF, etc...) ou des moyens plus modernes (satellites,...) [Moupfouma et Martin, 1985] depuis leur site de collecte jusqu'au lieu de leur traitement

A Douala nous avons utilisés deux types de systèmes: le système Argos et le système SAB 600 PLA.

III-a Le système d'acquisition et le système Argos

Conçu au CNET pour entreprendre des études de propagation sur le réseau de la Direction des Télécommunications du Réseau National, ce système de collecte de données est relié par satellite au réseau mondial de collecte et de transmission de données du système Argos.

Mis en oeuvre par le Centre National d'Etudes Spatiales (France) depuis 1979, en collaboration avec la NASA et le National Oceanic and Atmospheric Administration (USA), le système Argos permet l'implantation des systèmes d'acquisitions dans des sites pouvant être très éloignés des centres de traitement des données.

Le système automatique d'acquisition de données de propagation est constitué :

- d'un coffret d'acquisition contenant une carte à processeur arithmétique qui permet d'assurer un pre-traitement des données brutes sur le site, et une carte à microprocesseur pour stocker les données avant leur transmission.
- une balise émettant à 401,6 MHz à destination du satellite dès que celui-ci est en visibilité

Ce système peut traiter tout type d'informations analogiques ou numériques provenant de systèmes radioélectriques ou bien de capteurs météorologiques (pluviomètre, thermomètre, baromètre, etc...)

III-b Le système SAB 600 PLA

Le SAB 600 PLA est un système autonome de collecte et de stockage de données. Alimenté par 9 piles alcalines de 1.5V, il ne fonctionne que quand il se produit un événement (pluie...). Grâce à sa capacité de 8 K Octets, il peut stocker les informations sur le site pendant près de 3 mois jusqu'à ce qu'elles soient prélevées. Les données peuvent être transférées sur un compatible IBM PC ou prélevées au moyen d'un micro-ordinateur portable. C'est cette dernière solution qui a été adoptée pour Douala.

III-c Les pluviomètres

Dans le cadre de cette campagne de mesures, nous avons utilisé trois pluviomètres classiques à augets basculants (PLA) décrits dans le chapitre B et un pluviomètre à réponse rapide (PRR) conçu par le Rutherford Appleton Laboratory.

Le PRR a, comme son nom l'indique, une très faible constante de temps (10 secondes). Muni d'un compte-gouttes électronique, il transforme l'eau collectée grâce à un système spécial en un flux de gouttes de volume constant. Ces gouttes sont comptées durant la période T d'intégration choisie et le nombre de gouttes de volume constant est converti en intensité de précipitation en mm d'eau par heure. Les informations du PRR sont recueillies sous forme d'impulsions électriques et d'une tension analogique calibrée après intégration des impulsions électriques.

III-d Sites de mesures

On a choisi trois sites de mesures alignés suivant l'axe du faisceau hertzien Douala-Edéa (voir figure 1)

Ces trois sites : Douala 1, Douala 2, Douala Centre hertzien sont espacés de :

Douala 1 - Douala 2 → 2,5 km
Douala 2 - Douala CH → 2,7 km

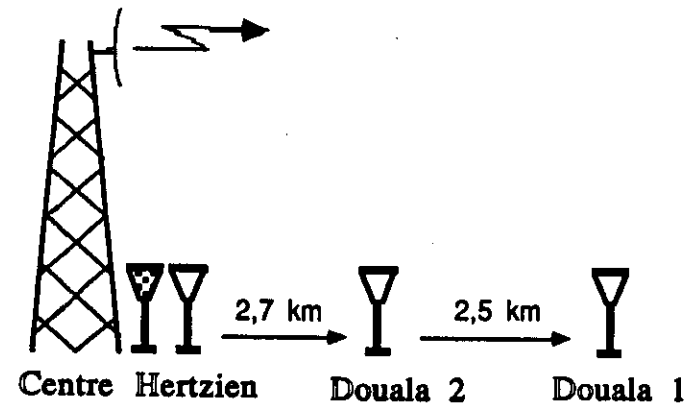


Fig.1: Schema de l'installation des pluviomètres à Douala

Les sites de Douala 1 et Douala 2 sont chacun équipés d'un système d'acquisition SAB 600 PLA et d'un pluviomètre à augets basculants, tandis que le site de Douala Centre hertzien est équipé avec le système Argos, le PRR et un PLA.

Des difficultés techniques n'ayant pas permis de collecter suffisamment de données à Douala-Centre hertzien, il ne sera question ici que de celles collectées à Douala 1 et Douala 2.

IV-Analyse des données collectées à Douala 1 et Douala 2

Douala qui bénéficie d'un climat équatorial connaît une longue saison de pluie qui débute aux alentours du mois de mars et se termine vers la fin du mois de novembre.

Les données analysées ci dessous couvrent la période juillet à novembre 1986. Comme nous l'avons vu, la pluie est un phénomène qui varie beaucoup spatialement et temporellement.

Dans ce qui suit, nous allons entreprendre :

- L'étude des variations journalières en analysant deux orages observés au cours du mois d'octobre.
- L'étude des variations mensuelles pour chaque site de mesures.
- L'étude des distributions des taux de précipitations pour chaque site, pour toute la période de mesures.
- L'étude de la distribution cumulative de la pluie à Douala.
- L'étude de la variation de l'étendue de la pluie pour une même fonction de temps d'observation sur une distance de 2,5 km.

IV-a Analyse de deux orages

Au cours du mois d'octobre, deux orages d'une violence exceptionnelle se sont abattus sur la ville de Douala. Ces événements observés le 23 et le 26 octobre sont représentés sur les figures 2 et 3.

Commencant à 2h30 du matin à Douala 2, cette pluie du 23 octobre a atteint la station Douala 1 à 2h37. Tant pour l'un que pour l'autre site, on observe sur la figure 2 que l'intensité de pluie la plus forte a été enregistrée dans les 2 à 3 minutes qui ont suivi le début de la pluie en chacun sites. On y remarque aussi que les fortes précipitations n'ont duré qu'une dizaine de minutes pour laisser place à une pluie stratiforme d'intensité n'excédant pas 40 mm/h, qui a duré le reste de la nuit.

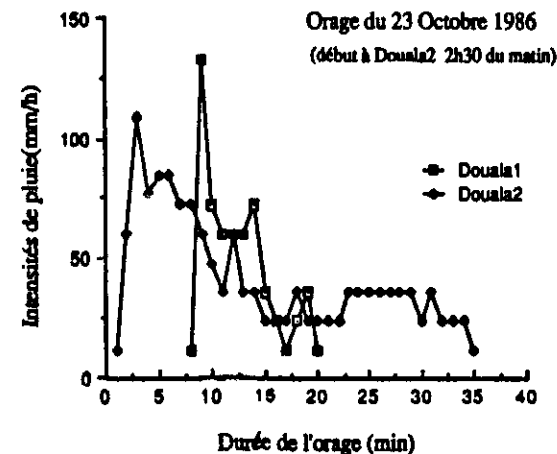


Fig 2: Analyse de l'événement de pluie du 23 Octobre à Douala

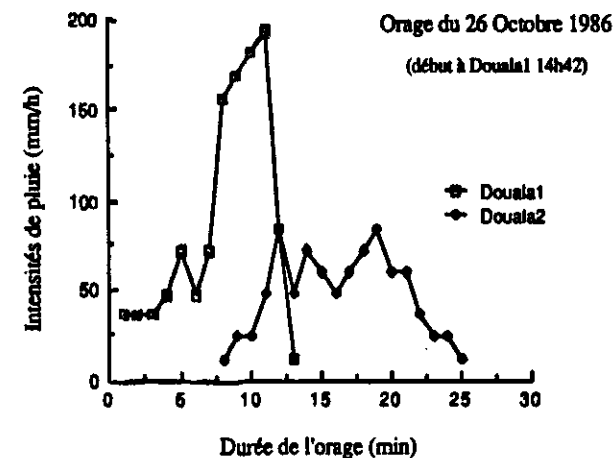


Fig 3: Analyse de l'événement de pluie du 26 Octobre à Douala

L'événement du 26 octobre (fig.3) a été le plus violent. Débutant à Douala 1 à 14h42mn où elle a duré 14mn, la pluie a atteint le site Douala 2 à 14h49mn. Les intensités les plus élevées ont été observées à Douala 1 entre la huitième et la onzième minute, après le début de la pluie, avec une pointe de 192 mm/h à la onzième minute.

Les intensités mesurées à Douala 2 sont moyennes et n'ont pas excédé 92 mm/h. Douala 1 a donc connu une pluie convective tandis que la pluie à Douala 2 était plutôt stratiforme.

Les figures 2 et 3 schématisent les caractéristiques des pluies tropicales : Les pluies convectives couvrent des surfaces assez réduites et ne sont observées que sur des durées très courtes, contrairement aux pluies d'intensités moyennes (pluies stratiformes) qui durent très longtemps et sont très étendues.

Les pointes des fortes intensités surviennent de manière aléatoire lors des pluies

IV-b Occurrence journalière de fortes précipitations à Douala

La connaissance de la période de la journée au cours de laquelle on enregistre les plus fortes précipitations est d'une grande importance pour les télécommunications dans les régions tropicales. Elle permet en effet de définir les tranches horaires de la journée au cours desquelles par exemple, les émissions de télévision ne seraient pas brouillées, ou pendant lesquelles on pourrait assurer la transmission des données avec le moins de perte d'informations possible.

Nous avons représenté sur les figures 4 et 5 tous les événements de pluie ayant des intensités allant de 60 à 100 mm/h d'une part, d'autre part ceux présentant une intensité supérieure à 100 mm/h. Ces observations ont été faites par tranches de trois heures pour le mois d'octobre (fig.4) et aussi pour l'ensemble des 5 mois de mesures (fig.5). La particularisation du mois d'octobre est due au fait que les plus forts orages y ont été observés. Une analyse des données collectées au cours de ce mois montre que c'est entre 21 heures et 9 heures du matin que l'on enregistre le plus grand nombre d'événements de fortes pluies, avec quelques orages en début d'après midi.

Les statistiques sur 5 mois de mesures montrent de façon plus globale que c'est entre 21 heures et midi que l'on enregistre le plus d'événements de fortes pluies avec des pointes entre 6 et 9 heures du matin, puis entre 21 heures et minuit. La période où la probabilité d'occurrence de fortes précipitations est très faible se situe entre 11h30 et 21h30. Cette tranche horaire pourrait donc être retenue pour les radiocommunications exigeant la meilleure qualité de transmission.

Ces figures 4 et 5 confirment les résultats obtenus à Brazzaville lors d'une

précédente étude [Moupfouma, 1982] et caractérisent bien les pluies tropicales c'est-à-dire :

- pluies convectives (dues aux variations locales des conditions atmosphériques et aux lignes de grain), dans l'après-midi ou en début de soirée,
- pluies stratiformes une partie de la nuit jusque dans la matinée, les pluies convectives pouvant se transformer en pluies stratiformes, et ces dernières pouvant contenir des cellules donnant des brèves mais très fortes pointes d'intensité de pluie.

IV-c Variations mensuelles des intensités de pluie à Douala

La pluie est comme tous les phénomènes météorologiques, essentiellement aléatoire, et c'est en cela que des mesures sur une courte période peuvent donner lieu à des conclusions erronées.

Afin de mieux faire ressortir la variabilité des précipitations, nous avons représenté sur les figures 6 et 7 les distributions mensuelles des taux de précipitations observées à Douala 1 et Douala 2.

leur analyse montre que

a) Sur le site de Douala 1 pour des pourcentages de temps supérieurs ou égaux à 0.02, les intensités de pluie observées au mois de juillet sont plus fortes que celles des autres mois. En deça de ce seuil, il apparaît clairement que c'est au cours du mois d'octobre que l'on a enregistré les intensités de pluie les plus élevées.

b) Sur le site de Douala 2, c'est plutôt au cours du mois de novembre que les intensités ont été les plus fortes et ceci pour tous les pourcentages de temps s'étendant de 0.005 à 0.35. En dehors du mois de Novembre, c'est le mois de juillet qui l'emporte pour les plus forts pourcentages de temps, et octobre pour les plus faibles pourcentages de temps.

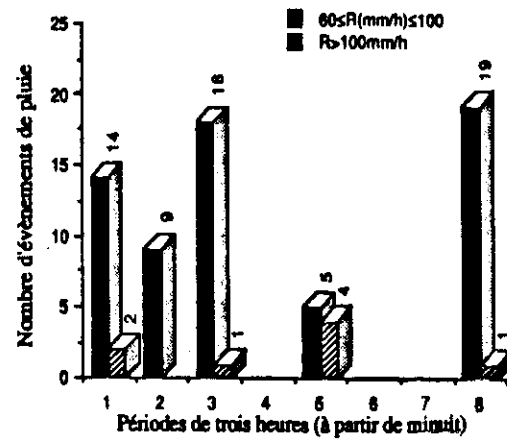


Fig.4: Distribution journalière des évènements de forts taux de pluie par périodes de trois heures en Octobre 1986 à Douala

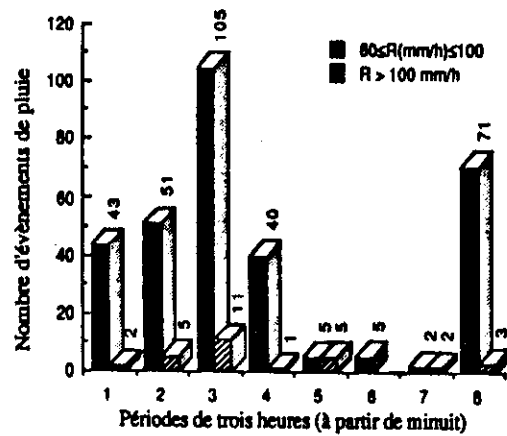


Fig.5: Distribution journalière des évènements de forts taux de pluie par périodes de trois heures de Juillet à Novembre 1986 à Douala

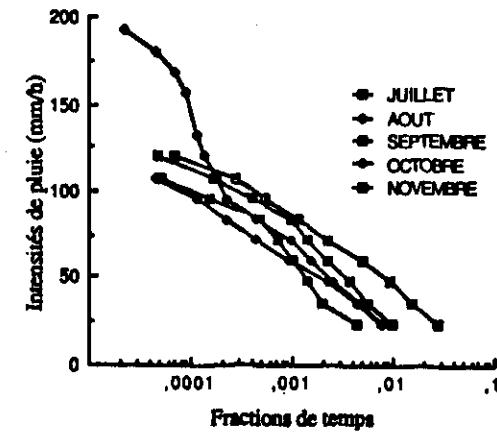


Fig. 6: Distribution mensuelle des précipitations à Douala1

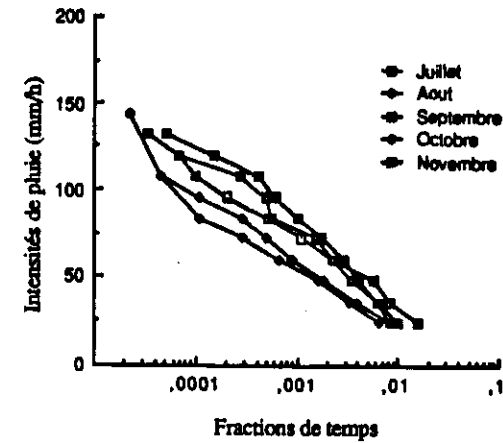


Fig.7: Distribution mensuelle des précipitations à Douala2

Malgré cette grande variabilité de la pluie d'un mois sur l'autre mais aussi d'un site à l'autre, on remarque cependant en ce qui concerne la valeur de l'intensité de pluie pour $10^{-2}\%$ du temps : $R_{0,01}$ (paramètre important dans l'étude des prévisions des intensités de pluie et des affaiblissements correspondants) qu'elle se situe dans l'intervalle 100 à 140 mm/h, c'est-à-dire la plage des valeurs de $R_{0,01}$ pour les régions tropicales.

Pour les systèmes de radiocommunications en ondes centimétriques ou millimétriques, la connaissance du mois le plus défavorable de l'année est très importante. Le CCIR définit celui-ci comme étant un mois civil ou une période quelconque de 30 jours (au cours d'une période de 12 mois consécutifs) qui est affectée de la probabilité la plus haute pour qu'un certain seuil prédéterminé soit dépassé. Notre étude ne nous permet pas pour le moment de déterminer ce mois, les mesures n'ayant couvert qu'une partie de la saison des pluies pour le moment.

IV-d Distribution ponctuelle des intensités de pluie sur toute la campagne de mesures

La pluie étant constituée d'un ensemble de cellules dont les dimensions sont variables, elle ne peut pas avoir une distribution uniforme en tout point d'une région où l'on fait des mesures. Le but de ce paragraphe est d'évaluer l'importance de ces variations à l'aide de deux endroits (Douala 1 et Douala 2) distants de 2.5 km.

Nous avons représenté sur la figure 8, les distributions des intensités de pluie mesurées en 5 mois sur chacun des deux sites. Il y apparaît de façon évidente que pour des intensités de pluie inférieures ou égales à 130 mm/h, c'est-à-dire pour des pourcentages de temps supérieurs ou égaux à $5 \cdot 10^{-3}$, les deux distributions sont très proches. La valeur de l'intensité de pluie observée pendant $10^{-2}\%$ est la même sur les deux sites. Les queues des deux distributions accusent par contre des comportements très différents et cela peut s'expliquer par plusieurs raisons interdépendantes :

- Tout d'abord elles sont constituées par de très fortes intensités de pluie liées à des événements rares, et qui ne couvrent que des étendues limitées.

- Ensuite l'emplacement géographique des stations par rapport à la mer et la lagune de Douala.

Une analyse de nos travaux antérieurs [article 5] montre que la proximité de la mer ou des grandes masses d'eau de façon générale, favorise davantage les pluies stratiformes avec des intensités moyennes que des pluies convectives avec de très fortes intensités. Douala 2 situé géographiquement plus proche de la mer que Douala 1 serait donc plus sujet aux pluies stratiformes qu'aux pluies convectives.

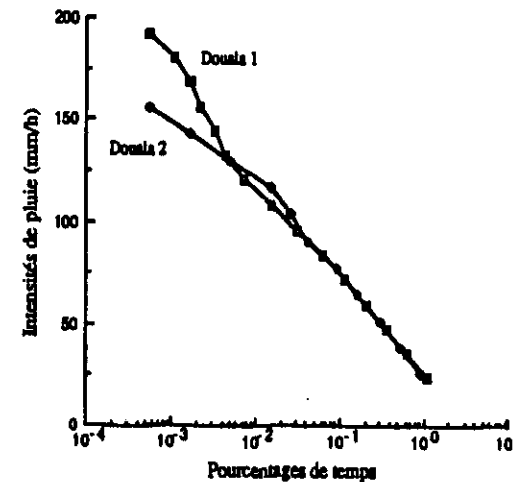


Fig.8 : Distributions ponctuelles des intensités de pluie à Douala 1 & Douala 2

IV-e Distribution cumulative des intensités de pluie

La distribution cumulative moyenne des intensités de pluie pour une région, constitue mieux que la distribution en un point de cette région (distribution ponctuelle) la clé du calcul des affaiblissements dus à la pluie. Représentant les intensités moyennes de la pluie dans la localité considérée, elle conduit en général, à des affaiblissements, plus proches des données expérimentales que ne le sont ceux obtenus avec la distribution ponctuelle qui a tendance à surestimer les affaiblissements calculés.

La figure 9 représente la distribution cumulative des intensités de pluie à Douala. Elle est définie ici pour chaque seuil d'intensité de pluie comme le rapport du nombre moyen de dépassements (chaque dépassement durant une minute), au nombre de minutes de la période d'observation. Ayant un temps d'intégration d'une minute, cette moyenne d'échantillons de une minute correspond par conséquent à la durée moyenne de mesures (en minutes) dans les deux stations. On y note que la valeur de l'intensité observée pendant 0.01% du temps est de 115 mm/h. Sur la queue de la distribution on reconnaît la présence des très fortes intensités dues aux orages enregistrés au mois d'octobre.

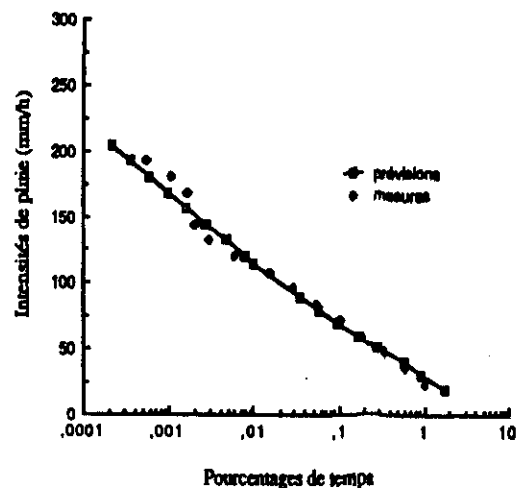


Fig. 9 : Distribution cumulative des intensités de pluie à Douala
 Comparaison des données expérimentales et des prévisions
 $u = (4 \cdot e^{-2}, 4.5e^{-2})$

IV-f Modélisation des statistiques de pluie à Douala

IV-f-1 Influence de l'environnement géographique sur les précipitations à Douala

La ville de Douala située à 4°04 de latitude Nord et 9°43 de longitude Ouest est un port maritime sur l'estuaire de Wouri (bras de mer à l'intérieur des terres) donnant sur l'Atlantique. La présence de grandes masses d'eau et les courants marins influencent comme nous l'avons mentionné dans la section 3 le comportement de la pluviométrie à Douala.

4-f-2 Comparaison des données expérimentales avec les estimations fournies par le modèle de prévision à double pentes

Utilisant le modèle de prévision (9) dans l'annexe 5 d'une part, et les atlas qui y sont proposés d'autre part, nous avons estimé la distribution cumulative des intensités de pluie mesurées à Douala en utilisant une valeur du paramètre "u" adapté à sa situation géographique : $u = (4e^{-2}, 4.5e^{-2})$.

Sur la figure 9, on voit que la distribution cumulative des données expérimentales à Douala est en bon accord avec l'estimation faite à partir de la méthode de prévision que nous proposons [Article 5]. Les fortes intensités de pluie qui correspondent à la queue de la distribution étant très importantes pour les radiocommunications, il est nécessaire d'entreprendre une campagne de mesures plus longue afin de mieux les déterminer.

IV-g Caractéristiques de la durée des précipitations à Douala

La durée des précipitations pour une intensité donnée devrait permettre de connaître la dimension des cellules de pluie si l'on connaît aussi la vitesse de celles-ci à l'endroit considéré. En zone tempérée, on prend comme vitesse de la cellule de pluie celle correspondant à la vitesse du vent au niveau 700 mb.

Dans les régions tropicales d'Afrique, on ne dispose pas de résultats de mesures de cette vitesse de la cellule de pluie à ce niveau de pression de référence. La figure 10 donne les caractéristiques de la durée de l'intensité de pluie à Douala. Les courbes de cette figure qui représentent le nombre de cas $N(R)$ (durant les 5 mois de collecte) pour lesquels un seuil d'intensité de pluie a été constamment dépassée pendant des durées d'au moins t minutes peuvent être représentées par la relation:

$$(1) \quad N(R, t) = Q(R) e^{-bt}$$

Par un calcul de régression linéaire, pour des valeurs d'intensités de pluie s'étendant de 48 à 144 mm/h, on trouve pour $Q(R)$ la relation telle que:

$$(2) \quad Q(R) = 3,8 \cdot 10^9 R^{-3,96} \quad (R \text{ mm/h})$$

b étant un paramètre défini dans le tableau 1

R (mm/h)	48	96	120	144
b	0,0028	0,04	0,3	0,38

Tableau 1: Valeur du paramètre b en fonction de $R(\text{mm/h})$

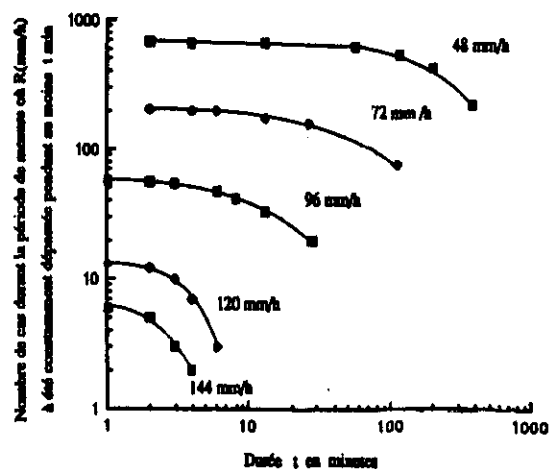


Fig.10 :Caracteristiques de la durée d'intensité de pluie à Douala

IV-h Probabilité (conjointe) de dépassement simultané d'une intensité de pluie donnée en deux points distants de 2,5 km

La connaissance de la dimension de cellules de pluie est très importante pour l'étude de la diversité d'emplacements en ce qui concerne les stations terriennes, ou de la diversité de trajet pour les liaisons terrestres.

Ces trajets ou ces emplacements doivent être choisis tels que la probabilité pour qu'ils soient traversés simultanément par une pluie de même intensité soit extrêmement faible et compatible avec la spécification de disponibilité retenues

Utilisant les données de pluie de l'orage exceptionnel qui est tombé à Douala le 26 octobre 1986, nous avons cherché à étudier la probabilité pour qu'un seuil donné d'intensité de pluie soit franchi simultanément à Douala 1 et Douala 2.

La figure 11 qui schématise ce résultat, montre que si la probabilité conjointe de dépassement d'un seuil de 50 mm/h de façon simultanée sur Douala 1 et Douala 2 est de 0.8, elle est de 1/3 pour $R_{0.01}$, c'est-à-dire pour 115 mm/h.

Cette probabilité est donc donnée dans ce cas par la relation suivante obtenue par régression

$$(3) \quad P_{1,2}(r > R) = 1,181 - 0,0076 R \text{ avec } R(\text{mm/h}) \text{ pour } R \geq 25 \text{ mm/h}$$

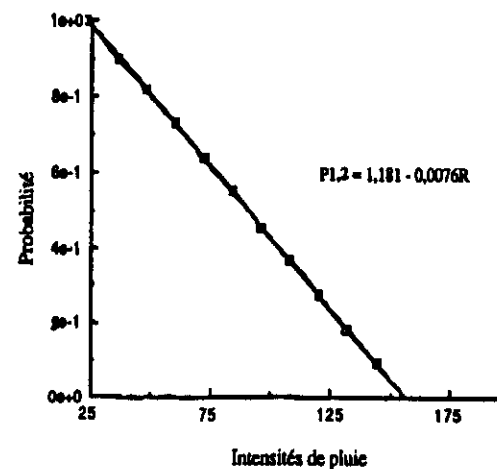


Fig.11: Probabilité conjointe de dépassement simultané d'un seuil d'intensité de pluie à Douala 1 & Douala 2

V-Conclusion

Ces premières données de l'étude des précipitations à Douala ont tout d'abord confirmé ce que nous savions déjà en analysant les données issues de 162 sites répartis à-travers le globe [article 5] à propos du comportement de la pluviométrie des localités riveraines de grandes étendues d'eau à savoir que celles-ci favorisent les pluies stratiformes dans l'environnement immédiat, tandis que les pluies convectives sont plus fréquentes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ces masses d'eau.

D'autre part elles ont permis de constater que :

1) les fortes intensités de pluies dues aux pluies de convection sont plus fréquentes entre 21 heures et midi, la pointe se situant dans l'intervalle 3 heures - 9 heures du matin,

2) la probabilité pour que l'intensité de pluie $R_{0,01} = 115\text{mm/h}$ observée pendant 10-2% du temps, c'est-à-dire l'intensité de référence pour le calcul des affaiblissements [Article9] soit observée simultanément en un deuxième point distant du premier de 2.5 km est de 1/3.

L'importance des points 1) et 2) est évidente. Le point 1 peut permettre le choix des tranches horaires pendant lesquelles on assurera la transmission des données, la programmation des émissions de télévision par ondes hertziennes, etc... sans risque de perturbations dues à la pluie.

Le point 2 apporte des informations dans l'éventualité du choix de la diversité d'emplacement quand il s'agit de stations terrestres, ou de la diversité de trajet quand il s'agit des liaisons horizontales en visibilité.

ARTICLE 7

RAIN EFFECTS ON MICROWAVE COMMUNICATIONS IN EQUATORIAL AND TROPICAL REGIONS

F. MOUPFOUMA AND N. SPANJAARD

Reprinted from IEEE Communications Society
 "IEEE Global Telecommunications Conference"
 December 1-4, 1986

RAIN EFFECTS ON MICROWAVE COMMUNICATIONS IN EQUATORIAL AND TROPICAL REGIONS

F. MOUPFOUMA
LAB/MER

N. SPANJAARD
PAB/RPE

C.N.E.T 38-40 av du General Leclerc
92131 Issy les Mux FRANCE

ABSTRACT

The aim of this paper is to characterize the specific aspects of equatorial and tropical climates in the computation of rain attenuation in the SHF band for slant microwave paths. In particular, the influence of raindrop size distribution, rain temperature, elevation angle and rain height will be discussed.

I - Introduction

The use of frequency bands at 14 and 11 GHz and at 30 and 20 GHz will permit the telecommunication administrations to increase their traffic. However, at these frequencies, rain can give rise to serious troubles, which can be overcome only if the rain characteristics which govern the allowable path length of the radioelectric system (raindrop distribution, dimension of rain cells, ...) are known for the region of concern. In this paper we deal only with the attenuations due to rain on satellite links in tropical regions.

ii - Characteristics of tropical rains

Many laws of raindrop size distribution can be found in the literature. Figure 1 shows the behavior of some of them for a rain intensity of 150 mm/h. Raindrop density $n(a)$ is plotted in terms of raindrop radius a . Only three laws, which seem to us suitable for convective rains (tropical rains), ... that is to say Joss-thunderstorm [1], Ajayi-Olsen [2] and Moupfouma [3] ..., and finally Marshall-Palmer [4] for sake of comparison, are used.

The raindrop distributions given by Joss, by Moupfouma and by Marshall and Palmer have an exponential form such as:

$$n(a) da = N_0 e^{-\Delta a} da \quad \text{with} \quad \Delta = A_0 R^{-p} \quad (1)$$

$n(a)$ is the number of raindrops per unit volume with radius lying between a and $a + da$, R the rain intensity, and N_0 , A_0 , p parameters the values of which are given in literature [1], [3], [4].

On the other hand, Ajayi and Olsen showed that in tropical regions the raindrop distribution has a gamma behavior and is described by:

$$n(D) dD = 0.070 D^{1.43} \exp(-386 R^{-0.432} D^{2.6}) dD \quad \text{with } R < 15 \text{ mm/h} \quad (2)$$

$$n(D) dD = 0.056 D^{1.43} \exp(-895 R^{-0.515} D^{3.1}) dD \quad \text{with } R > 15 \text{ mm/h} \quad (3)$$

where $n(D)$ is the number of raindrops the effective diameter of which lies between D and $D + dD$.

On figure 1, whereas Joss's model and Moupfouma's model show that, for a rain intensity equal to 150 mm/h, larger raindrops are more numerous in tropical regions than in temperate regions, on the contrary Ajayi and Olsen's model privileges more than all the others the mean-sized raindrops with radius lying between 1 and 2 mm.

III - Validity of the different models

Rain intensity may be computed using the following relation where $v(a)$ is the raindrop limit fall velocity [6]

$$R = \frac{4\pi}{3} \int_0^{a_{\max}} v(a) a^3 n(a) da \quad (5)$$

Comparison of nominal and computed rain intensities, using the above four raindrop size distributions and relation (5) with $a_{\max} = 3.5$ mm, is outlined in table 2.

IV - Specific aspects of rain attenuation in tropical regions

In this paragraph we study the behavior of the complex refractive index of water and the cross section of raindrops in order to examine the influence of the warm rains which characterize tropical regions for microwave links.

IV-1 Refractive Index of water

If ϵ_r is the dielectric constant of water, its complex refractive index is defined by the relation:

6.2.1.

$$m = \sqrt{\epsilon_r} \quad (6)$$

Real and imaginary parts of m are plotted on figure 2 for different temperatures. It can be noticed on the curves which represent the imaginary part of m that the frequencies lying between 10 GHz and 30 GHz correspond to the maximum water absorption for the chosen temperatures (here 0°C to 30°C), this effect being more important at 0°C. As a matter of fact it is the resonance absorption dipole centered between 1 cm and 3 cm and already noticed by Ray [5].

On the other hand, the real part of the index has its maximum value at 0°C and minimum at 30°C for the frequencies less than 6 GHz. The phenomenon is reversed for frequencies greater than 6 GHz.

IV-2 Raindrop cross sections

Let us assume an electromagnetic wave the propagation constant of which is k incident on a raindrop. The field strength scattered at a distance r in the direction θ is expressed by:

$$E_s = S(\theta) e^{-jkr} / jkr \quad (7)$$

where $S(\theta)$ represents the scattering amplitude.

Writing:

$$\alpha = (2\pi a) / \lambda \quad (8)$$

where λ is the wavelength and a is the raindrop radius, the normalized total cross section agrees with the following relation:

$$\frac{\sigma_{\alpha, m}}{\pi a^2} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (9)$$

Nominal rain intensity (mm/h)	Computed rain intensity (mm/h)			
	Marshall-Palmer	Joss-Storm	Ajeyi-Olsen	Moupfoume
5.0	5.9	4.4	5.1	4.6
25.0	28.5	20.2	25.6	24.6
50.0	54.7	38.4	50.8	50.1
100.0	105.0	72.5	100.0	100.9
200.0	200.0	135.8	195.9	201.3
250.0	245.0	166.0	243.0	251.0

Table 2

where a_n and b_n are the Mie coefficients.

Restricting ourselves to Mie scattering theory, we studied on figure 3 the behavior of the normalized cross section as a function of the raindrop radius for temperatures equal to 0, 5, 10, 15 and 20°C. This figure shows clearly the phenomenon of resonance: a hump can be noticed between 1.5 and 2 mm of raindrop radius. It corresponds to a relative maximum of the Mie coefficients a_n and b_n . Van de Hulst [6] showed that the first of these maxima (when there are several of them) occurs when the raindrop radius a and the refractive index m are related by:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\operatorname{Re}(m)} \approx k a \approx \frac{\pi}{\operatorname{Re}(m)} \quad (10)$$

On figure 3 the first maximum of the cross section is obtained with water temperature equal to 20°C. Knowing that $m = 7.58 - 2.18i$ at 20°C and 11 GHz, one can therefore obtain from relation (10):

$$a = (\lambda / 2 + 7.88) = 1.7 \text{ mm}$$

This value is in good agreement with the one read on the curve.

IV-3 Computation of specific attenuation

Van de Hulst [6] showed that the specific attenuation Γ expressed in dB/km may be obtained by the following relation:

$$\Gamma = 8.686 \int_0^{\infty} Q(a) n(a) da \quad \text{dB/km} \quad (11)$$

On the other hand, Olsen and et. [7] showed that this relation can be approximated by:

$$\Gamma = k R^S \quad \text{dB/km} \quad (12)$$

Using the T-matrix method for the computation of the total cross sections of raindrops and the above four raindrop size distributions, we compared on figure 4 specific attenuations computed from relation (11) for different frequencies in vertical polarization at a rain rate equal to 150 mm/h and a temperature equal to 20°C. The attenuations computed using Joss's distribution are the lowest at all frequencies. Those computed using Moupfoume's and Marshall and Palmer's distributions are nearly equal for the frequencies ranging from 10 to 17 GHz, whereas attenuations computed using Ajeyi and Olsen's and Marshall and Palmer's distributions are nearly equal between 17 and 20 GHz. This can be explained by the fact that the higher the frequency, the more sensitive it is to small and mean-sized raindrops.

V - Effects of raindrop size and canting angle on specific attenuation

Figure 5 gives the contribution to specific attenuation of raindrops as a function of their sizes. It was derived from relation (11) and Moupfoume's distribution, assuming a rain intensity equal to 100 mm/h, a water temperature of 20°C, and a 20 GHz satellite link in vertical polarization at different elevation angles: 0°, 30° and 60°, where 0° corresponds to horizontal links.

Whatever the elevation angle, it clearly appears that raindrops the effective radius of which lies between 1.5 and 2 mm have the strongest influence on attenuation. It can also be noticed that the contribution to attenuation by raindrops the radius of which lies between 0.25 mm and 1 mm does not depend on elevation.

VI - Characteristics of rain attenuation on slant paths

For the computation of attenuation on slant paths it is necessary to know the precipitation height and the reduction factor which allow the vertical and horizontal inhomogeneity of rain structure to be taken into account.

At the present stage, there is no known mathematical relation giving precipitation height in equatorial and tropical regions. Some observations of the 0°C isotherm height made in Douala (Cameroon) and Bengui (Central African Republic) during the heaviest rains season are reported in table 3. They allow precipitation height in tropical regions to be roughly estimated. These isotherms appear to be higher than in temperate regions.

Height of 0°C isotherm in Douala during July 1980						
Date	3	6	10	15	19	21
Height (m)	4600	5030	4700	6070	4600	4400
Pressure (mb)	584	556	578	563	580	590

Height of 0°C isotherm in Bengui during July 1980				
Date	2	10	18	26
Height (m)	4900	4600	4900	4650
Pressure (mb)	555	570	550	575

Table 3

As a result of this lack of data we used the precipitation height relation recently proposed by CCIR [8]:

$$\left. \begin{aligned} h_R &= 4 - 0.075 (36 - \phi) \quad \text{km} \quad \text{for } \phi > 36^\circ \\ h_R &= 4 \quad \text{km} \quad \text{for } \phi \leq 36^\circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

where ϕ is the latitude, expressed in degrees, of the Earth station.

The length of the Earth-space path through the rain is given by the relation:

$$l_s = (h_R - h_s) / \sin \theta \quad \text{for } \theta \geq 10^\circ \quad (14)$$

where h_s is the station altitude above sea level and θ is the elevation angle of the radioelectric path. If θ is less than 10°, a more complicated expression of l_s must be used.

In order to take into account the spatial inhomogeneity of rain, two different correction coefficients are introduced:

1) CCIR coefficient [8]:

$$r_p = \frac{90}{90 + 4 l_s \cos \theta} \quad (15)$$

2) coefficient proposed by Moupfoume [9]:

$$r_{eq} = \frac{\eta p^\beta \left[\frac{R_{0.01}}{R(p)} \right]^{0.1}}{1 + 0.03 \left[\frac{p}{0.01} \right]^{-0.36} l_s} \quad (16)$$

$$m = 1 + 1.4e^{-4} = F \cdot 1.76 \cdot \log_e(1s)$$

where F is the frequency expressed in GHz, and $R_{0.01}$ and $R(p)$ are the rain intensities observed during 0.01% and $p\%$ of the time respectively. η and β depend on the pluviometric climatology of the region of interest. In the case of Innisfail (Australia) which have a tropical climate and which is within the frame of our study, their values are:

$$\alpha = 0.51 \quad \beta = 0 \quad \text{for } 0.001 < P(X) < 0.02$$

$$\alpha = 0.57 \quad \beta = 0.06 \quad \text{for } 0.02 < P(X) < 1$$

The correction factor given by relations (16) may become greater than 1 for the lower rain intensities. Hence, as opposed to the CCIR coefficient given by relation (15), it is not a reduction factor.

Total attenuation along the path may be written:

$$A = \int_0^L \Gamma(x) dx \quad \text{dB} \quad (17)$$

where $\Gamma(x)$ is the value, expressed in dB/km, of the specific attenuation at the point x of the path and is given by relation (11) or (12). Usually this relation is approximated by:

$$A = T' L_{eq} \quad \text{dB} \quad (18)$$

where L_{eq} is the effective path length, expressed in km, on which rain is assumed uniform.

Using relations (14) and (15) on the one hand, relations (14) and (16) on the other hand, the effective path length may be obtained from one of the two following relations:

$$L_{eq} = L_s r_p \quad \text{according to CCIR method} \quad (19)$$

$$L_{eq} = L_s r_{eq} \quad \text{according to Moufoume's method} \quad (20)$$

Thus according to CCIR, rain attenuation on slant paths for any time percentage $p(\%)$ ranging from 0.001% to 0.1%, may be obtained from the relation:

$$A(p) = \Gamma(0.01) r_p L_s b p^{-a} \quad \text{(dB)} \quad (21)$$

where $\Gamma(0.01)$ is the specific rain attenuation corresponding to 0.01% of the time and a and b are two coefficients given by the following relations:

$$\begin{aligned} a &= 0.33 & b &= 0.22 & \text{for } 0.001\% < p < 0.01\% \\ a &= 0.41 & b &= 0.15 & \text{for } 0.01\% < p < 0.1\% \\ a &= 0.50 & b &= 0.12 & \text{for } p > 0.1\% \end{aligned}$$

According to Moufoume's method, rain attenuation on slant paths at any time percentage can be derived from the relation:

$$A(p) = \Gamma r_{eq} L_s \quad \text{(dB)} \quad (22)$$

In this work, we used both relations (11) and (12) for evaluating rain specific attenuation, and both CCIR and Moufoume's correction coefficient for deriving total attenuation. We compared these total attenuations with the data from Innisfall, which are among the rare available in the tropical regions and are measurements made by R. K. Flevin [10] by means of radiometers and rain gauges. The results of this comparison is presented on figures 6 to 7.

As a whole, the radioelectric path correction coefficient given by relation (16) appears on these two figures to give better results for these tropical data than the CCIR correction coefficient. On figure 6 the attenuations computed using Marshall and Palmer's distribution and Moufoume's distribution appear to be, for a frequency equal to 11 GHz, closer the measured attenuations than those obtained using of the relation $k R^6$. On figure 7, which was plotted using the CCIR correction coefficient, Jose's distribution leads to results rather close to measured attenuations.

VII - Conclusion

We reviewed the different characteristics of tropical rains and their effects on telecommunication systems. As a result of the lack of attenuation data on multi-frequency links, particularly above 10 GHz, we were not able to reach definitive conclusions. However, Moufoume's raindrop distribution appears to give the best results up to 17 GHz, and Ajayi and Olsen's raindrop distribution above.

REFERENCES

1. Jose J. and al., "The variation of raindrop size distributions at Lourenço", *Proc. Int. Conf. Cloud Physics*, pp 369 - 373, 1968
2. Ajayi B.O., Olsen R.L., "Modeling of a tropical raindrop size distribution for microwave and millimeter wave applications", *Radio Science*, vol. 20, n°2, pp 193 - 202, April 1985
3. Moufoume F., Tiffon J., "Raindrop size distribution from microwave scattering measurements in equatorial and tropical climates", *Elect. Letters*, vol. 18, n°23, pp 1112-1113, 1st Nov. 1982
4. Marshall J.S., Palmer W.M., "The distribution of raindrops with size", *J. Meteor.*, vol. 5, pp 165 - 166, Aug 1946
5. Ray P.S., "Broadband complex refractive indices of ice and water", *J. Appl. Opt.*, vol. 11, pp 1836 - 1844, 1972
6. Van de Hulst H.C., "Light scattering by small particles", *John Wiley and sons, Inc., New-York*, 1957
7. Olsen R.L. and al., "The aR^b relation in the calculation of rain attenuation", *IEEE Trans. on Ant. and Propag.*, vol. AP-24, pp 319 - 329, March 1976
8. CCIR Interim Working Party 5/2, Doc. 85/48, Nice, France, May 1985

6.2.4.

9. Moufoume F., "Rain induced attenuation prediction model for L.O.S and Earth - satellite microwave links", (to be published)

10. R.K. Flevin, "Earth-space path rain margins above 10 GHz in Australia", *Research Laboratories Report 7359*, Telecom Australia May 1980

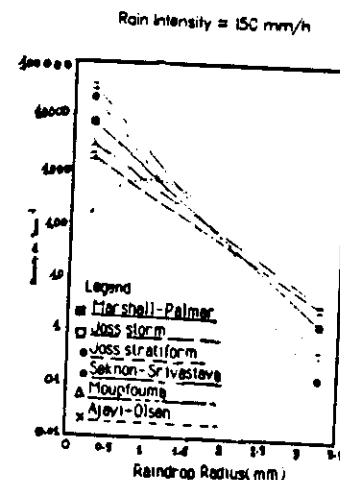


Figure 1

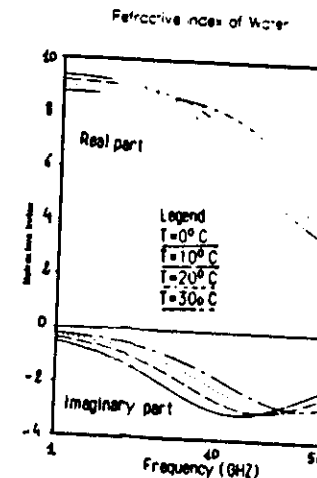


Figure 2

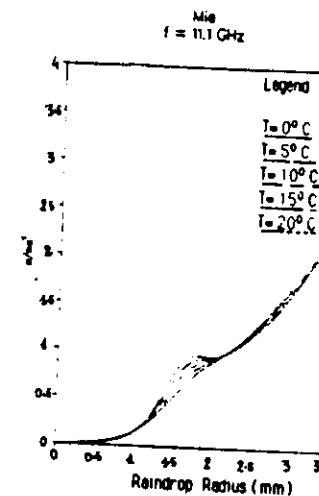


Figure 3

6.2.5.

$\theta = 20^\circ \text{ C}$ $\epsilon = 60^\circ$ $R = 150 \text{ mm/h}$
Vertical Polarisation

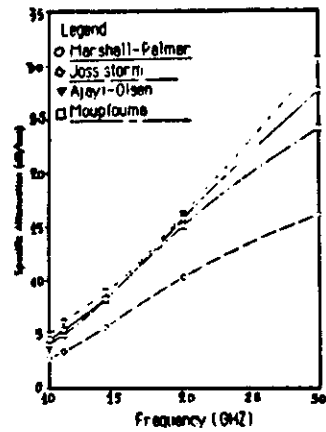


Figure 4

Influence of raindrop size
on attenuation
 $F = 20 \text{ GHz}$ $R = 100 \text{ mm/h}$
parameter incidence angle

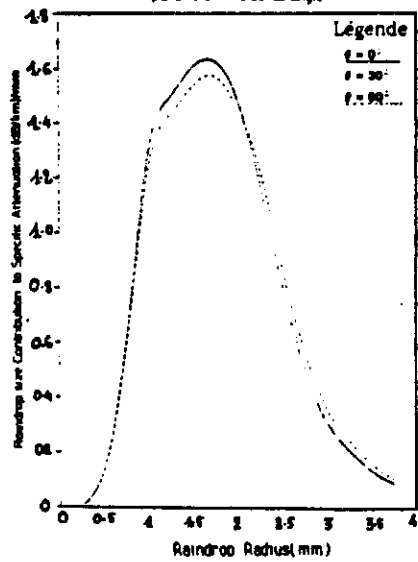


Figure 5

6.2.6.

Innisfail 111 GHz 74.12 - 76.10
 $\theta = 20^\circ \text{ C}$
 L_{ref} : Mouploume

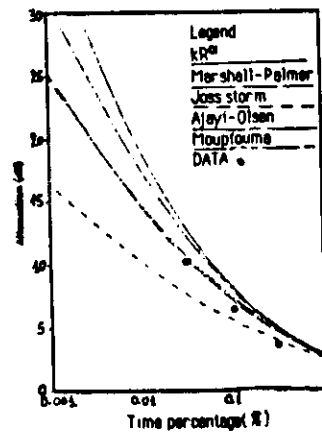


Figure 6

Innisfail 111 GHz 74.12 - 76.10
 $\theta = 20^\circ \text{ C}$
 L_{ref} : C.C.I.R.

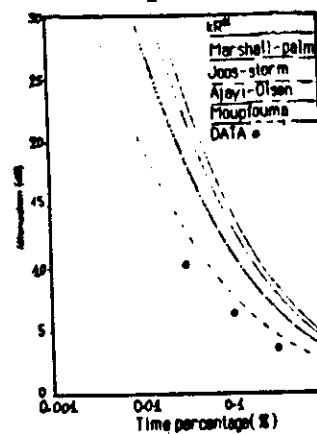


Figure 7

ARTICLE 8

Consultative Committee (CCIR) is made. It appears that our prediction method reveals good agreement with experimental data from different locations in the world.

I. INTRODUCTION

Above a certain threshold of frequency, the excess attenuation due to rainfall becomes one of the most important limits of the performance of line-of-sight (LOS) microwave links. In temperate climates this frequency threshold is about 10 GHz, while in tropical climates is general and in equatorial climate particularly, since raindrops are larger than in temperate climates, the incidence of rainfall on radio links becomes important for frequencies as low as about 7 GHz [1]-[3]. Estimates of rain attenuation are usually derived from the available information on rain rates observed in the geographical area considered. Most of the many methods proposed for predicting rain induced attenuation make use of the rainfall cumulative distribution measured at a point. Certain authors have used the concept of equivalent path-averaged rain rate [5] which is obtained by multiplying the point rain rate for the time percentage of interest by a reduction factor, while other authors use an effective path length the value of which is obtained in multiplying the actual path length by a reduction coefficient [6]. This effective path length is the hypothetical length of a path along which the attenuation for a given time percentage results from a point rainfall rate that occurs for the same time percentage. Rain intensity over this effective path length is assumed to be constant [4]. In this communication, a prediction method using effective path length is proposed and compared with the prediction method recently adopted by the International Radio Consultative Committee (CCIR) during its XVth Plenary Assembly held in 1982.

II. DESCRIPTION OF THE PROPOSED METHOD

The rain induced attenuation on a line-of-sight (LOS) path can be expressed as

$$A(\text{dB}) = kR^n L_{\text{eff}} \quad (1)$$

with

$$L_{\text{eff}} = r l \quad (2)$$

Improvement of a Rain Attenuation Prediction Method for Terrestrial Microwave Links

PIDILE MOUPPOUMA

Abstract—An empirical model for predicting rain induced attenuation on terrestrial paths using effective path length is proposed. Comparisons with the currently prediction method proposed by the International Radio

Manuscript received April 24, 1984; revised July 20, 1984.
The author is with CNET/CYRE, 38-40 rue du General Lacaze, 92131 Issy-les-Moulineaux, France.

where R (km) is the actual path length, L_{eff} the effective path length, and r a reduction coefficient having the well-known form [11]

$$r = \frac{1}{1 + Cr^m} \quad (3)$$

with C and m coefficients we will define later.

The attenuation A (dB) and the one minute rain rate R (mm/h) are calculated for the same time percentage. k and α are regression coefficients depending on frequency and polarization and allowing the calculation of the estimate specific attenuations through

$$v_R = kR^\alpha \quad (4)$$

The values of k and α used in the present work are those given by Fedi [8].

To derive C and m , we used experimental data obtained in 30 terrestrial radio links in the 7-38 GHz band range with path lengths up to 58 km, located in the Congo, Japan, U.S., and Europe [6], [9], and well-known fitting procedures.

We found that C depends on probability level P (percent) of interest for which data are available, and m depends on the radio link path length on the one hand, and on its frequency on the other hand. Finally, the resultant formula for the path length reduction factor is given by

$$r = \frac{1}{1 + 0.03 \left(\frac{P}{0.01} \right)^{-\beta} l^m} \quad (5)$$

with

$$m(F, l) = 1 + \psi(F) \log_e l \quad (6a)$$

and

$$\psi(F) = 1.4 \times 10^{-4} F^{1.76} \quad (6b)$$

where F (GHz) is the frequency.

The β coefficient is given as a result of a best fit by

$$\beta = 0.45, \quad \text{for } 0.001 < P(\text{percent}) < 0.01 \quad (7a)$$

$$\beta = 0.6, \quad \text{for } 0.01 < P(\text{percent}) < 0.1 \quad (7b)$$

$$l > 50 \text{ km} \quad \beta = 0.36, \quad \text{for } 0.001 < P(\text{percent}) < 0.01 \quad (7c)$$

$$\beta = 0.6, \quad \text{for } 0.01 < P(\text{percent}) < 0.1 \quad (7d)$$

In Section IV it will be seen that the use of the empirical forms given by (5)-(7d) appears to yield reasonable agreement with available data by using (1)-(3).

The effective path length reflects the spatial inhomogeneity. Its frequency dependence which appeared here in the reduction coefficient r (6b) results from both the nonuniformity of the rain along the radio link path, and the nonlinear dependence of the specific attenuation rain rate [12].

III. CCIR ATTENUATION PREDICTION METHOD [6], [7]

The rain attenuation prediction method recently adopted by the CCIR consists in first calculating the attenuation $A_{0.01}$ exceeded during 0.01 percent of time, and secondly in deriving

the attenuation A_P exceeded for other percentages P of time

$$A_{0.01} = kR_{0.01}^\alpha L_{eff} \quad (8)$$

$$A_P = bA_{0.01}P^{-a} \quad (9)$$

where

$$r = \frac{90}{90 + 4l} \quad (10)$$

$R_{0.01}$ is the rain intensity exceeded for 0.01 percent of the time (with an integration time of 1 min) and

$$b = 0.22 \text{ and } a = 0.33, \quad \text{for } 0.001 < P(\text{percent}) < 0.01 \quad (11a)$$

$$b = 0.15 \text{ and } a = 0.41, \quad \text{for } 0.01 < P(\text{percent}) < 0.1 \quad (11b)$$

IV. TEST OF THE PREDICTION MODELS

The method for testing prediction models used here has been suggested recently by CCIR [10].

For each percentage of time (from 0.001 to 0.1 percent of the year) for which data are available, we have calculated the percentage error e_i (percent) between predicted attenuation A_P (dB) and measured attenuation A_m (dB) for each of 30 terrestrial radio links (with $i = 1, 2, \dots, 30$) located in Congo (Brazzaville), Japan, U.S., and Europe [6], [9].

$$e_i = \frac{A_P - A_m}{A_m} \times 100 \quad (12)$$

Minor measurement inaccuracies were overlooked by assuming that

$$e_i = 0, \quad \text{if } |A_P - A_m| < 1 \text{ dB} \quad (13)$$

The root mean square (rms) values D_e of the e_i values were then calculated for each percentage of time according to

$$D_e = [\mu_e^2 + \sigma_e^2]^{1/2} \quad (14)$$

where μ_e and σ_e are the mean and standard deviation of the e_i values for each percentage time.

According to evaluation procedures adopted by the CCIR, the preferred prediction method is the one producing the smallest rms values [4], [10].

In Table I rms values calculated from our prediction method (1)-(7), are compared to those obtained from the CCIR one ((8)-(10)) for various percentages of time.

It has to be noted that we have used here rainfall measurements taken simultaneously with the link attenuation. Larger deviations would be expected if statistical rainfall data are employed.

Inspection of this table shows that according to the CCIR criteria, our prediction method gives a better accuracy for seven of the nine probability levels for which data are available. Moreover results are not as good as the CCIR method predictions for $P = 6.10^{-2}$ and 1.10^{-1} . These are due to the weak attenuations involved in the calculations of (12) and are thus less significant for the system designers.

It is to be noted in Table I that we have used percentage of time ranging from 0.001 to 0.1 percent because all the rainfall data available from study group 5 of CCIR for use in studies of radio propagation on line-of-sight paths are given in this range [6], [9].

Figs. 1 to 8 show some comparisons of both the CCIR model

TABLE I
A, α , D_e VALUES FOR THE CCIR AND PROPOSED NEW METHOD AS
FUNCTION OF TIME PERCENTAGE

	Percentage of time (%)									
	10^{-3}	2.10^{-3}	3.10^{-3}	6.10^{-3}	10^{-2}	2.10^{-2}	3.10^{-2}	6.10^{-2}	10^{-1}	
v_R	5	2.2	0.5	0.05	1.5	6.36	0.06	-9.8	-17.7	Our method
α	10.7	0.6	0	0.6	0.6	7.7	9.0	15.0	16	
D_e	11.0	0.9	0	0.7	0.7	0.9	9.0	10.6	23.0	
v_R	-3.2	-6.3	-6	-3.6	-4.8	-3.6	-4.3	-4.3	-4.7	CCIR method
α	17.4	11.9	13.7	9.9	0.3	11.2	11.1	12.9	15.7	
D_e	14.6	13.3	13	11.4	10.5	12.3	12	13.6	16.4	

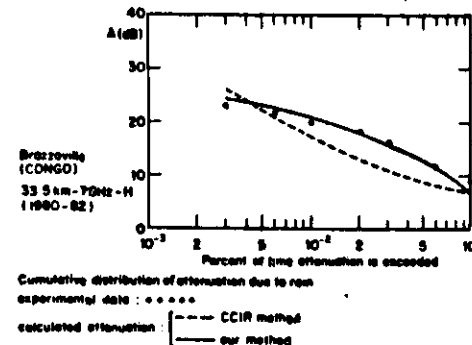


Fig. 1. Brazzaville (Congo): path length 35.5 km; $F = 7$ GHz polar H; (1980-1982).

and ours, with data from several regions: Ivory Coast, Congo, France, United Kingdom, Italy, Norway, and the U.S.

Data gathered in Ivory Coast (and not included in the interim CCIR data bank) during the Copt 1981 experiment by J. Tiffon [11] are included in the ranges $0.01 < P(\text{percent}) < 0.1$ and $0.1 < P(\text{percent}) < 1$, we use

$$\beta = 0.6, \quad \text{for } 0.1 < P(\text{percent}) < 1 \quad (15)$$

In (5), for the prediction method we propose in this communication, and

$$b = 0.12 \quad a = 0.5, \quad \text{for } 0.1 < P(\text{percent}) < 1 \quad (16)$$

for the CCIR method [7].

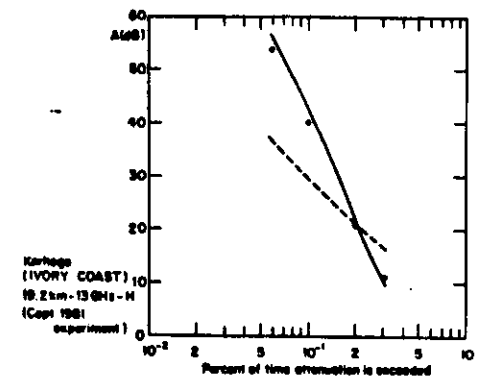


Fig. 2. Ivory Coast (Copt 1981 experiment): path length 19.2 km-13 GHz-N (Copt 1981 experiment).

One can see that in general, the prediction method we propose reveals better agreement with experimental data than the CCIR model.

V. CONCLUSION

We have proposed an empirical model for predicting rain induced attenuation on terrestrial paths. It requires the knowledge of 1-min rain intensities recorded in the considered geo-

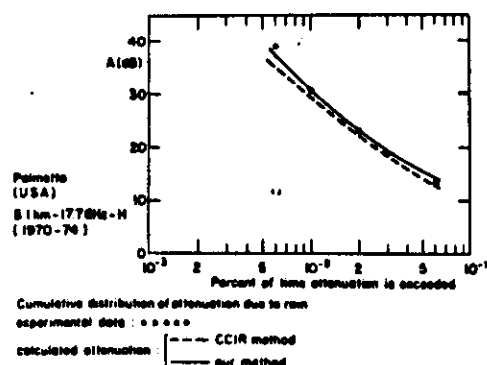


Fig. 3. Palmato (U.S.), 5.1 km, 17.7 GHz, H (1970-1974).

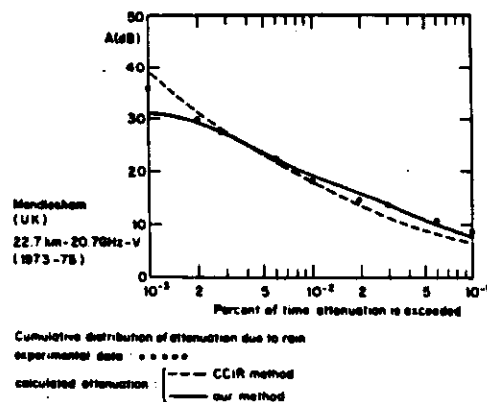


Fig. 4. Mendlesham (U.K.), 22.7 km, 20.7 GHz, V (1973-1975).

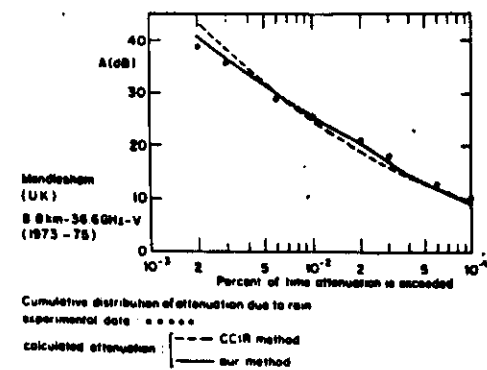


Fig. 5. Mendlesham (U.K.), 8.8 km, 36.6 GHz, V (1973-1975).

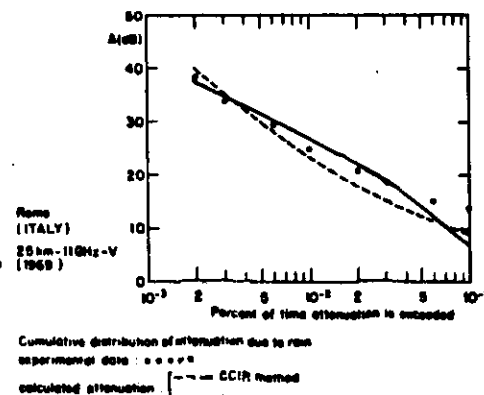


Fig. 6. Rome (Italy), 23 km, 11 GHz, V (1969).

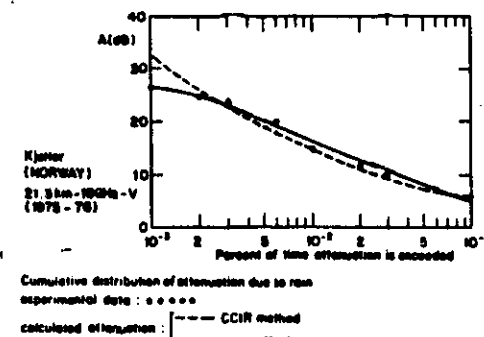


Fig. 7. Kjeller (Norway), 21.3 km, 18 GHz, V (1975-1976).

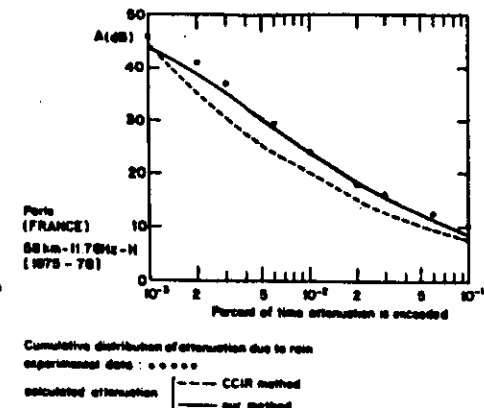


Fig. 8. Paris (France), 58 km, 11.7 GHz, H (1975-1978).

graphical area and the corresponding respective percentages of time P during which these rain intensities are exceeded.

It is interesting to note that predictions derived from our model in some 30 terrestrial radio links for path lengths ranging from 1.3 to 58 km, and for frequency bands from 7 to 38 GHz, located in Africa, Europe, North America, and Japan, are in good agreement with the experimental data (see Table I and Figs. 1 to 8).

ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to thank Dr. Martin Hall of S. R. C., Rutherford and Appleton Laboratories (Slough, U.K.) and Professor J. P. Mon of CRPE (CNET/Paris) for many valuable suggestions and discussions.

REFERENCES

- [1] F. Mouffouas, "Etude de la propagation des ondes radioélectriques en climat équatorial et tropical," thèse doctorat ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des télécommunications, Paris, CNET/CRPE, 1982.
- [2] F. Mouffouas and J. Tiffon, "Raindrop size distribution from microwave scattering measurements in equatorial and tropical climates," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 1012-1014, 1982.
- [3] F. Mouffouas and J. Tiffon, "Etude théorique et expérimentale de l'affaiblissement de propagation par les précipitations équatoriales," *Proc. URSI (Commission F)*, 1983, Symposium Louvain, Belgium, June 1983 (ESA SP-194).
- [4] CCIR, vol. V, Rep. 721-1 XVth plenary assembly Geneva, 1982.
- [5] F. Mouffouas and J. Tiffon, "Démonstration théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique," *Ann. des Télécomm.*, vol. 30, May-June 1975.
- [6] CCIR, vol. V, rep. 336-4, XVth plenary assembly Geneva, 1982.
- [7] CCIR, document 5/155 (rev. 1), working group 5-B, Geneva, 1983.
- [8] P. Fink, "A simple method for predicting attenuation maxima on terrestrial and earth-space paths," *Fondazione Ugo Bordoni* 1981, Rep. 18-1081.
- [9] CCIR, document 5/162 (rev. 1), working group 5-D, Geneva, 1983.
- [10] CCIR, document 5/176, working group, 5-D, Geneva, 1983.
- [11] J. Tiffon, "Etude de l'affaiblissement de propagation à 13 GHz des nuages tropicaux," *Ann. des Télécomm.*, May-June 1983.
- [12] H. M. Khalallah and R. L. Olsen, "Frequency dependence of the effective path length," *Electron. Lett.*, vol. 16, no. 2, June 5, 1980.

ARTICLE 9

Rain induced attenuation prediction model
for terrestrial and satellite-Earth microwave links

Fidèle MOUPFOUMA *

Abstract

At microwave frequencies, rain is the main cause of degradation of the performances of satellite and terrestrial communications systems, essentially in tropical zones. The design and implementation of such systems involve the knowledge of the propagation parameters which govern link availability and service quality. Thus it seems desirable to develop prediction methods for deriving approximate attenuation statistics for any microwave link. In this paper, a rain induced attenuation model using the concept of equivalent path length is proposed for terrestrial and satellite links. As far as slant paths are concerned, the proposed prediction model uses a parameter, the value of which depends on the geographical zone. These values are given for zones where data are available: Europe, Australia, USA, Japan. The version of the model proposed for Australia (in its tropical part) can be extended to all other tropical zones of the world.

Key words: Electromagnetic wave propagation, Microwave, Attenuation, Rain, Radio-relay link, Earth satellite propagation, Statistical forecasting.

MODÈLE DE PRÉVISION
DES AFFAIBLISSEMENTS
DUS À LA PLUIE
SUR DES LIAISONS
HERTZIENNES TERRESTRES
ET PAR SATELLITE

Analyse

À haute fréquence, la pluie constitue la principale source de dégradation des performances des liaisons hertziennes terrestres et par satellite. La planification de tels systèmes nécessite la connaissance des paramètres de propagation qui régissent la disponibilité des futures liaisons et la qualité de service. Il paraît

donc souhaitable de disposer de méthodes de prévision pour en tirer des statistiques d'affaiblissements pour n'importe quelle liaison. Dans cet article, on propose une nouvelle méthode de prévision des affaiblissements dus à la pluie sur des liaisons hertziennes terrestres et par satellite. Cette méthode est basée sur la notion de trajets radioélectrique équivalent. En ce qui concerne les liaisons par satellite, le modèle utilise un paramètre dont la valeur dépend de la zone géographique considérée. Ces valeurs sont calculées ici pour les zones où les données de pluie sont disponibles: Europe, Australie, USA, Japon. La valeur utilisée pour l'Australie (dans sa partie tropicale) peut l'être aussi pour d'autres régions tropicales du monde.

Mots clés: Propagation onde électromagnétique, Hyperfréquence, Affaiblissement, Pluie, Faicceau hertzien, Propagation Terre satellite, Prévision statistique.

Contents

- I. Introduction.
 - II. Rainfall structure.
 - III. Rainfall attenuation prediction model.
 - IV. Application to terrestrial paths.
 - V. Evaluation of rain attenuation along Earth-space paths.
 - VI. Some comments on the estimated attenuations.
 - VII. Conclusion.
- References (15 ref.).

I. INTRODUCTION

The behaviour of communication systems is closely dependent on local climatology. The design and implementation of such systems involve an

* Conseiller scientifique au CNET (DCE/TA), en liaison avec LAR MER et PAR REP, 92131 Issy-les-Moulineaux.

accurate knowledge of propagation parameters which govern link availability and service quality.

Propagation abnormalities adversely affect the performances of communication systems. Those abnormalities are generally classified into clear air effects, and rain induced perturbations. For satellite and terrestrial communication systems operating at frequencies above 10 GHz, rain is the principal cause of signal degradations, especially in tropical regions.

Based on the assertion that the spatial rain distribution along a path is composed of several cells, a rain induced prediction model using the concept of equivalent path length is proposed for satellite and terrestrial links in this paper.

II. RAINFALL STRUCTURE

Two types of rainfall are generally considered [1], namely convective rains and stratiform rains. The first one is characterized by strong showers with high rain rates which are generally observed in small areas for a short period of time. The second one concerns medium and lower intensities. They have a longer duration and may extend over very large areas.

As a general rule, rain consists of cells and is never uniform on a path. To account for this inhomogeneity in the computation of attenuation, a correction coefficient is introduced.

As far as the vertical structure of precipitations is concerned, studies reveal for stratiform rain :

- an upper region constituted by snow and ice,
- a lower region in which liquid water predominates.

Between these two regions is the so called bright-band, corresponding roughly in temperate climates to the 0°C isotherm.

For the convective rain it has been found that [2] rain rates higher than 100 mm/h can be observed above the 0°C isotherm. Calculation of the attenuation for slant paths is then carried out by assuming a uniform rain extending from the ground to an effective height which corresponds to rain height [3] and will be defined later. The height of the rain top varies with rain structure and with latitude. Thus it cannot be the same in temperate zones as in tropical ones.

III. RAINFALL ATTENUATION PREDICTION MODEL

Prediction laws are semi-empirical since they are derived from experimental statistics. However they are not all based on the same concept. Some authors

use the concept of equivalent rainfall intensity [2], others that of effective radio path length [4]. This paper will only deal with the latter concept.

In a previous paper [5] we proposed a prediction model for terrestrial radio links. We adopted the equiprobable relationship between point rainfall intensity and path attenuation based on the effective path length relation which means assuming that the rain structure along the effective path is uniform.

In other words, P being the exceedance probability associated with a point rainfall rate R_p , we determined the equiprobable rain attenuation A_p such that :

$$(1) \quad P(A > A_p) = P(r > R_p).$$

Basic formulation.

L_{eq} being the effective path length, the rain induced attenuation is such that :

$$(2) \quad A_p(\text{dB}) = \Gamma(R_p) L_{eq},$$

where $\Gamma(R_p)$ represents the specific attenuation (or per-kilometer attenuation) and will be defined later.

$l(\text{km})$ being the physical radio path length and r a correction coefficient, the effective path length is given by :

$$(3) \quad L_{eq} = rl.$$

So using (2) and (3), the rain attenuation can be found from :

$$(4) \quad A_p(\text{dB}) = \Gamma(R_p) l.$$

Thus :

$$(5) \quad r = \frac{A_p(\text{dB})}{\Gamma(R_p) l}.$$

Using long term statistics of rain attenuation data in equation (5), the author showed previously [5] that r can be expressed as :

$$(6) \quad r = \frac{1}{1 - 0.03(P/0.01)^{-0.36} f^{0.11}},$$

with :

$$(7) \quad m(f, l) = 1 + 1.4 \cdot 10^{-4} f^{1.76} \log_e(l),$$

where f (GHz) is the radio frequency, and $P(\%)$ the time percentage for which the rain attenuation is predicted. Values of parameter β depend on the path length and are given in the literature [5].

However, we afterwards found it interesting to propose a new formula giving the correction coefficient for the calculation of the effective radio path length such as :

$$(8) \quad C(l, f, R_p, P) = A(l, f, R_p, P) / \Gamma(R_p) l,$$

$$(9) \quad C(l, f, R_p, P) = \frac{u(P) (R_{0.01} / R_p)^{1/m}}{1 - \gamma_1 (P/0.01)^{-0.36} f^{0.11}},$$

where $R_{0.01}(\text{mm/h})$ and $R_p(\text{mm/h})$ represent point

TABLE I. — Values of parameter u for terrestrial links.

Valeurs du paramètre u pour des liaisons terrestres.

Characteristics of the radio path	Expressions of $u(P)$ as function of P	
	$P < 0.01\%$	$P > 0.01\%$
$l < 5 \text{ km}$ and $f < 25 \text{ GHz}$	$821.4 P^2 - 34.6 P + 1.3$	$0.93 e^{1.14P}$
$l > 50 \text{ km}$ with any f (GHz)	$0.74 P^{-0.01}$	$1.48 P^{-0.104}$
All other cases	$0.71 P^{-0.01}$	$0.89 e^{1.0P}$

rainfall intensities observed on the radio path during 0.01 % and $P(\%)$ of the time, respectively, P being the same time percentage for which the attenuation exceedance is to be calculated.

$m(f, l)$ is given by relation (7), and it should be recalled that the frequency dependence of C is due both to the inhomogeneity of rain along the path and to the non-linearity of the relationship between specific attenuation and rain rate [5].

Parameters u , v and η were determined using attenuation data from the CCIR data base [6]. While u depends on the type of path : terrestrial or slant path, v and η are given for any path, by :

$$(10) \quad v(l) = 0.38 l^{-0.45}.$$

$$(11) \quad \eta = \begin{cases} 0 & \text{if } l < 5 \text{ km and } f < 25 \text{ GHz} \\ 0.03 & \text{In all other cases} \end{cases}$$

$$(12) \quad \eta = \begin{cases} 0 & \text{if } l < 5 \text{ km and } f < 25 \text{ GHz} \\ 0.03 & \text{In all other cases} \end{cases}$$

Relation (11) is easily explainable, since a short link ($l < 5 \text{ km}$) may be contained almost entirely in one rain cell. Moreover, according to the analysis we carried out, for frequencies lower than 25 GHz, the rain effects observed on a radio link with a path length smaller than 5 km, are similar to those due to a uniform rainfall on the whole path considered.

IV. APPLICATION TO TERRESTRIAL PATHS

IV.1. Determination of parameter u on terrestrial links.

The data used here are those given by CCIR data base [6]. Moreover, to agree with the CCIR Testing group I of Study group 5 [7], we have increased by 8 %, the rainfall intensity values from Leidschendam on the one hand, and have not used data from Rio de Janeiro on the other hand.

Analysing all the data used here, we noticed that one has to distinguish three cases.

Parameter u which depends on the radio path

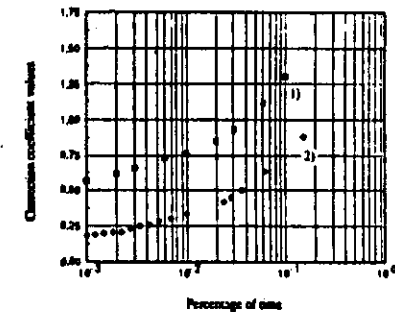


FIG. 1. — Behaviour of the correction coefficient for terrestrial paths.

- 1) Mendlesham - UK (7.4 km, 19.4 GHz - V).
- 2) Paris - France (58 km, 11.7 GHz - H).

Comportement du coefficient de correction des trajets terrestres.

characteristics is expressed for each of those three cases as (Table I).

IV.2. Behaviour of the correction coefficient versus rain rate.

Figure 1 points out the variations of the correction coefficient as a function of time percentage for a long radio path link on the one hand, and for a short one on the other hand. In both cases it can be noticed that the correction coefficient increases with time percentage, which in other words means that the lower the rain rate, the higher the correction coefficient. As far as the long radio path corresponding to a French radio link near Paris (58 km, 11.7 km) is concerned, the correction coefficient has values smaller than 1 whatever the percentage of time, while the short radio path which concerns a British radio link near Mendlesham (19.4 GHz, 7.4 km) shows values greater than 1 for high time percentages. Thus we cannot adopt the notion of a "reduction factor"

for relation (9) but rather that of « correction factor or correction coefficient ».

As a matter of course, it results from the foregoing that the effective radio path length increases with decreasing rain rate.

IV.3. Rainfall attenuation calculation for terrestrial microwave links.

Specific attenuation $\Gamma(R_p)$ is related to the point rainfall rate R_p (mm/h) through :

$$(13) \quad \Gamma(R_p) = k R_p^\alpha \quad (\text{dB/km}),$$

where k and α are parameters depending on operating frequency, rain temperature and raindrop shape [8]. In general, raindrops are assumed to be spheres, oblate spheroids or shaped according to the Pruppacher and Pitter model [10]. For spherical raindrops, the attenuation is independent of wave polarization, while for other shapes, it depends on the polarization of the transmitted field, and on the canting angle of the raindrops.

IV.3.1. Proposed method.

Substituting for $C(l, f, R_p, P)$ in (4) and using equation (13), the attenuation suffered by a terrestrial radio link is then given by :

$$(14) \quad A_r(\text{dB}) = k R_p^\alpha \frac{u(P) (R_{0.01}/R_p)^{0.381-0.32}}{1 - \gamma(P/0.01)^{-0.36} l^{(1/\alpha-1)}}$$

with γ and u given by equations (11), (12) and Table 1.

IV.3.2. CCIR method.

Following the CCIR [12], the attenuation due to rain on a terrestrial link is given by :

$$(15) \quad A_r(\text{dB}) = k R_{0.01}^\alpha l^b P^{-a},$$

with :

$$(16) \quad b = 0.12 \text{ and } a = 0.546 - 0.043 \log_{10}(P),$$

$$(17) \quad r_s = \frac{1}{1 + 0.043 l},$$

r_s is the so called reduction coefficient since, it is always lower than 1. l represents the physical path length. $R_{0.01}$ (mm/h) the rainfall intensity exceeded for 0.01 % of the time, and $P(\%)$ the time percentage for which the attenuation is to be calculated.

IV.4. Comparison of the performances of the two prediction methods.

In Figures 2 to 3 the attenuations derived from the above two models are compared to experimental data gathered in Darmstadt (FRG) and Paris (France).

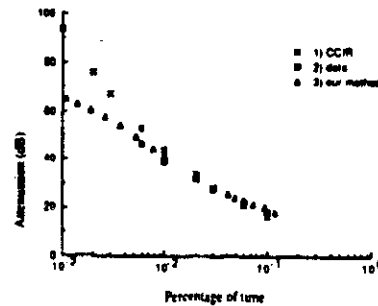


FIG. 2. — Rain attenuation on terrestrial path Darmstadt - FRG (29 GHz, 20 km, H-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison terrestre.

- × 1) CCIR.
- 2) Données expérimentales.
- Δ 3) Notre méthode.

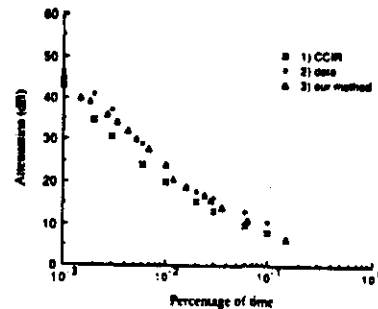


FIG. 3. — Rain attenuation on terrestrial path Paris - France (11.7 GHz, 58 km, H-Pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison terrestre.

- × 1) CCIR.
- 2) Données expérimentales.
- Δ 3) Notre méthode.

A fairly good agreement is obtained with our model both for short and long radio links. Moreover, a testing method proposed by CCIR [11] has been used for exceedance time percentages ranging from 0.001 % to 0.1 %. The percentage error e_i has been evaluated for the 38 radio links we investigated such that :

$$(18-a) \quad e_i = \frac{A_p - A_m}{A_m} 100 \quad (i = 1 \text{ to } 38),$$

where A_p (dB) represents the predicted attenuation, since A_m (dB) is the measured one.

The measurement inaccuracy has been partly taken into account by putting $e_i = 0$ if :

$$(18-b) \quad |A_p - A_m| < 1 \quad (\text{dB}),$$

TABLE II. — Percentage errors.

Pourcentages d'erreurs.

Percentages of time		0.001 %	0.002 %	0.003 %	0.006 %	0.01 %	0.02 %	0.03 %	0.06 %	0.1 %
μ_e	Proposed model	2.3	2.9	2.9	2.2	0.8	0.3	2.6	2.1	2.6
	CCIR model	— 7.1	— 7.1	— 7.6	— 5.5	— 5.6	— 4.1	— 4.7	— 6	— 7.6
σ_e	Proposed model	13.9	10.5	10.8	10.7	8.4	8.2	9.4	13.9	20.5
	CCIR model	12.6	13.3	12.7	12.3	10.8	10.5	11.5	13.9	15.7
D_e	Proposed model	14	10.9	11.2	10.9	8.4	8.2	9.8	14.1	20.7
	CCIR model	14.5	15	14.8	13.5	12.2	11.3	12.4	15.1	19

μ_e being the mean and σ_e the standard deviation of the error distribution defined as :

$$(19-a) \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{1}{38} \sum_{i=1}^{38} e_i^2 - \left(\frac{1}{38} \sum_{i=1}^{38} e_i \right)^2},$$

the root mean square (r.m.s.) value D_e of the errors :

$$(19-b) \quad D_e = \sqrt{\mu_e^2 + \sigma_e^2},$$

constitutes the most convenient parameter for a comparison between the prediction methods according to CCIR [11]. Values of μ_e , σ_e , and D_e corresponding to different time percentages are listed in Table II for our prediction model and the CCIR one. Its inspection shows that generally our proposed model gives better results than the CCIR model.

V. EVALUATION OF RAIN ATTENUATION ALONG EARTH-SPACE PATH

As aforesaid, the prediction of rain attenuation on earth-space links requires the knowledge of the elevation angle of the slant path, the height of the earth station above the sea level and its latitude. The ground station height is important since the length of the propagation path crossing the rainy zone decreases with increasing altitude. This leads to lower rain attenuation when the ground station is installed on the top of a mountain, than when it is at the mountain base.

As far as the rain height is concerned, though it is known in temperate zones, due to the lack of data, no mathematical law governing it for tropical zones is known now [9].

Rain temperature constitutes also an important parameter. While it is usually assumed that for terrestrial paths rain temperature is about 20° C, such an hypothesis no longer holds for slant paths, since temperature decreases with height. 0° C is

supposed to be a more suitable value for the rain temperature on Earth-space paths whatever the climate [8].

V.1. Determination of the slant path length through rain.

As recommended by CCIR study group 5 [3], the vertical rain height H_R (km) expressed in terms of latitude φ (degrees) is :

$$(20) \quad H_R = \begin{cases} 4 & 0 < \varphi < 36^\circ, \\ 4 - 0.075 (\varphi - 36) & \varphi \geq 36^\circ. \end{cases}$$

Thus the slant path length L_s is obtained from :

$$(21) \quad L_s = \begin{cases} \frac{H_R - H_0}{\sin \theta} & \text{for } \theta < 5^\circ, \\ \frac{H_R - H_0}{(\sin^2 \theta + 2 \frac{H_R - H_0}{8500})^{1/2} + \sin \theta} & \text{for } \theta \geq 5^\circ, \end{cases}$$

where θ is the path elevation angle, and H_0 (km) is the station height above mean sea level.

V.2. Application of the concept of correction factor to slant paths.

Attenuation on Earth-space paths will be estimated here by an extension of the rain attenuation prediction method for terrestrial paths given by relation (14). The terrestrial physical path length l (km) is now replaced by the slant path length L_s . Thus the predicted rain attenuation on a satellite link can be obtained from :

$$(22) \quad A_r(\text{dB}) = k R_p^\alpha \frac{u(P) (R_{0.01}/R_p)^{0.381-0.32}}{1 - \gamma(P/0.01)^{-0.36} L_s^{(1/\alpha-1)} L_0},$$

with :

$$(23) \quad m(f, L_s) = 1 + 1.4 \cdot 10^{-4} f^{1.36} \log_{10}(L_s).$$

The parameter γ is given by relations (11) and (12) as a function of path length L_s and frequency f (GHz).

V.2.1. Determination of parameter u for slant paths.

Since for terrestrial paths the horizontal structure of rainfall mainly influences the rain attenuation calculations, for slant paths the vertical structure and the horizontal one act together. So this will lead for Earth satellite paths to rather different values of parameter $u(P)$, in relation to terrestrial path.

Rain induced attenuation data for slant paths in the CCIR data base [6] or in the literature, are well distributed among the countries for which they are available : Australia, Europe, Japan, USA ; this is not the case for terrestrial microwave links for which most of the available data belong to Europe [6].

Australia, Europe, Japan, USA are not characterized by the same types of precipitations [12] about which we know that they influence the rainfall structure. So, instead of proposing, in the case of satellite paths, a global method for the whole world, we favour rather a zonal rain attenuation prediction method fitted to the above respective four regions ; which we could not do for terrestrial paths, due to the small size of their data base (38 links only).

This zonal prediction method is governed by parameter $u(p)$, the expressions of which are listed in Table III. These expressions are derived for each one of the four zones from long term measurements [6] in the frequency band ranging from 10 to 30 GHz.

Using the CCIR model, the path reduction factor for 0.01 % of the time is given by :

$$(24) \quad r_s = \frac{1}{1 + 0.045 L_s \cos \theta}$$

The path attenuation exceeded for the useful time percentage P is calculated from:

$$(25) \quad A_p(\text{dB}) = k R_{0.01}^2 r_s L_s^b P^{-a},$$

with parameters a and b given by relation (16).

V.2.2. Prediction accuracy for Earth-space paths.

Before carrying on with this paragraph, it seems necessary to us to warn the reader about the following.

TABLE III. — Evaluation of parameter u for slant paths.

Evaluation du paramètre u pour des liaisons obliques.

Regions	Parameter u for slant paths as a function of time percentage $P(\%)$	
	$L_s \geq 5 \text{ km}$	$L_s \leq 5 \text{ km}$
Australia	$u = 0.24 P^{-0.18}$	$u = 0.47 P^{-0.08}$
Europe	$u = 1.11 P^{-0.026}$	$u = -38 P^2 - 7 P + 0.65$
Japan	$u = 1.54 P^2 - 1.3 P - 0.9$	$u = 1.73 P^{-0.11}$
USA	$u = -0.3 P^2 - 0.007 P - 0.82$	$u = 1.3 P^{-0.04}$

Rain induced attenuations on earth satellite paths are generally lower than on terrestrial links. So, for high time percentages, deviations between the measu-

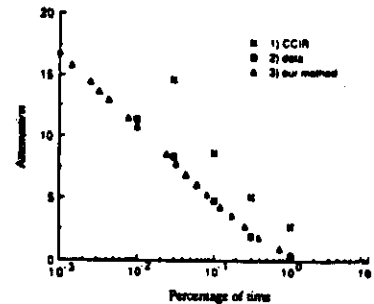


FIG. 4. — Rain attenuation on slant path Darwin - Australia (11.1 GHz, 60 deg. elev., V-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison oblique.

- 1) CCIR.
2) Données expérimentales.
3) Notre méthode.

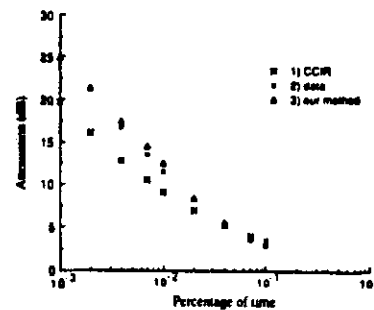


FIG. 5. — Rain attenuation on slant path Lario - Italy (11.6 GHz, 32 deg. elev., H-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison oblique.

- 1) CCIR.
2) Données expérimentales.
3) Notre méthode.

TABLE IV. — CCIR rain climatic zones [15]. Rainfall intensity exceeded (mm/h).
Zones climatiques du CCIR [15]. Intensités de pluie dépassées (mm/h).

Percentage of time	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1.0	—	1	—	3	1	2	—	—	—	2	—	4	5	12
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	13	22	35	63
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

TABLE V.a. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Australia.
 A_m = Measured attenuations ; A_p = Predicted attenuations with our method.
 A_s = Predicted attenuations with CCIR method.

Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques en Australie.
 A_m = Affaiblissements mesurés ; A_p = Affaiblissements calculés avec notre méthode.
 A_s = Affaiblissements calculés avec la méthode du CCIR.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol	Exceedance time percentages							
				1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	
1 Darwin (AUS)	12.4 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (7) (27) (71) (115) (156) (197) (236)	$A_m(\text{dB})$ 0.8 2.9 5.8 9.2 12.3	$A_p(\text{dB})$ 0.72 2.59 6.3 10.2 13.4	$A_s(\text{dB})$ 3.4 6.4 10.8 18.3 28.2				
2 Darwin (AUS)	12.4 S	14.2	V	$R_p(\text{mm/h})$ (7) (27) (71) (115) (156) (197) (236)	$A_m(\text{dB})$ 1.4 4.3 9.7	$A_p(\text{dB})$ 1.3 4.4 10.2	$A_s(\text{dB})$ 5 9.4 16				
3 Darwin (AUS)	12.4 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (5) (24) (49) (86) (130) (178) (215)	$A_m(\text{dB})$ 0.4 2 4.8 8.3 11.4	$A_p(\text{dB})$ 0.3 2.2 4.3 7.3 10.7	$A_s(\text{dB})$ 2.7 5.1 8.6 14.6 22.5				
4 Darwin (AUS)	12.4 S	14.2	V	$R_p(\text{mm/h})$ (5) (24) (49) (86) (130) (178) (215)	$A_m(\text{dB})$ 3.4 7.6	$A_p(\text{dB})$ 3.8 7.0	$A_s(\text{dB})$ 7.6 12.9				
5 Innisfail (AUS)	17.6 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (21) (41) (70) (107) (142) (180) (203)	$A_m(\text{dB})$ 1.6 3.3 6.3 10.2	$A_p(\text{dB})$ 1.6 3.3 6.6 11.2	$A_s(\text{dB})$ 4.2 7.9 13.4 22.7				
6 Innisfail (AUS)	17.6 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (25) (37) (89) (121) (149) (180) (203)	$A_m(\text{dB})$ 1.6 2.5 6.4 9.8	$A_p(\text{dB})$ 1.4 3.7 6.4 9.8	$A_s(\text{dB})$ 3.6 6.8 11.5 19.4				
7 Clayton (AUS)	37.9 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (16) (36) (53) (82) (113)	$A_m(\text{dB})$ 1 2.1 4.3 7.7 10.3	$A_p(\text{dB})$ 0.9 2.2 3.6 5.9 8.5	$A_s(\text{dB})$ 3.1 5.3 8.1 12.4 17.4				
8 Clayton (AUS)	37.9 S	14.2	V	$R_p(\text{mm/h})$ (7) (16.5) (35.5) (54) (82.5) (111.5)	$A_m(\text{dB})$ 0.9 1.7 3.4 6.4 10.7	$A_p(\text{dB})$ 0.7 1.6 3.6 5.8 9.2	$A_s(\text{dB})$ 3 5 8.5 13 20				
9 Clayton (AUS)	37.9 S	11.1	V	$R_p(\text{mm/h})$ (8.5) (17) (32.5) (52) (79) (102)	$A_m(\text{dB})$ 1 1.8 3.2 5.2 9.3 10.8	$A_p(\text{dB})$ 0.9 2 4.3 7.1 11 13.7	$A_s(\text{dB})$ 3.3 5.6 9.5 14.7 22.4 31.4				

TABLE V.b. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Europe.
 Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques en Europe.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol		Exceedance time percentages						
					1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %
10 Leenheim (D)	49.9 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(1.4)	(3.3)	(6.7)	(15)	(32.9)	(50.7)	(68.6)
				A_m (dB)			1.2	2.6	6	10.3	14.8
				A_p (dB)			1.3	3.3	6.9	10.2	13.9
				A_e (dB)			2	3.3	5.2	7.9	11
11 Leenheim (D)	49.9 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(1.8)	(3.9)	(7.4)	(17.6)	(33)	(66.1)	(83)
				A_m (dB)			1.4	3.1	7.8	14.7	21.1
				A_p (dB)			1.7	3.9	7	13.2	15.5
				A_e (dB)			2	3.3	5.2	7.9	11.1
12 Gornitz (F)	48.7 N	11.6	H	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	(74)
				A_m (dB)			1.3	2.2	3.3	4.7	9.3
				A_p (dB)			0.9	1.4	2.7	4.8	7.6
				A_e (dB)			1.4	2.4	4	6.2	9.4
13 Gornitz (F)	48.7 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	(74)
				A_m (dB)			1.6	2.4	3.8	5.4	7.9
				A_p (dB)			0.8	1.2	2.3	4	6.3
				A_e (dB)			0.7	1.1	1.9	3	4.5
14 Gornitz (F)	48.7 N	14.5	C	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	(74)
				A_m (dB)			2.6	3.7	5.2	7	10.9
				A_p (dB)			1.4	2	3.6	6.2	9.5
				A_e (dB)			1	1.8	3	4.6	7
15 Spino d'Adda (I)	45.4 N	11.6	V	R_p (mm/h)	(5)	(9.9)	(27)	(55)	(92.5)	(126)	(166)
				A_m (dB)			2.6	6.5	14	22.7	34
				A_p (dB)			2.5	6.8	13.3	21.1	31
				A_e (dB)			4	6.7	10.3	15.8	23
16 Lario (I)	46.2 N	11.6	C	R_p (mm/h)	3.2	(7)	(12.5)	(27.8)	(52)	(84)	(117)
				A_m (dB)			2.9	6.5	11.5	18	27
				A_p (dB)			3.2	6.8	12.4	19	28
				A_e (dB)			3.5	6	9.2	14	21
17 Stockholm (S)	59.3 N	11.6	H	R_p (mm/h)			(5)	(10.1)	(22)	(35.5)	(46)
				A_m (dB)			0.7	1.8	3.9	6.6	9.3
				A_p (dB)			1.1	2.2	4.7	7.2	8.7
				A_e (dB)			1.3	2.2	3.4	5.2	7.3
18 Albertslund	55.7 N	11.8	C	R_p (mm/h)			(9)	(16)	(33)	(53)	(73)
				A_m (dB)			1.4	2.3	4.5	7.8	11
				A_p (dB)			1.8	3	5.9	8.9	12
				A_e (dB)			1.5	2.2	3.4	4.8	6.8
19 Martlesham (G)	52.1 N	11.6	H	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)	(68)	(88)
				A_m (dB)			3.8	5.7	8	10.3	12.6
				A_p (dB)			3.3	5.9	8.2	10.5	12.8
				A_e (dB)			2.4	3.7	5.2	7.3	9.4
20 Martlesham (G)	52.1 N	14.5	C	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)	(68)	(88)
				A_m (dB)			5.5	8.1	11.6	16.7	21.1
				A_p (dB)			5.1	8.7	11.9	16.7	21.1
				A_e (dB)			3.8	5.8	8.1	11.1	14.1
21 Martlesham (G)	52.1 N	11.8	C	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)	(68)	(88)
				A_m (dB)			3.6	5.4	7.9	10.9	13.9
				A_p (dB)			3.2	5.8	8	11.1	14.1
				A_e (dB)			2.4	3.7	5.1	7.3	9.4
22 Fucino (I)	42.0 N	11.6	C	R_p (mm/h)	(5)	(8.5)	(15)	(26)	(46)	(69)	(92)
				A_m (dB)			1.2	1.9	3	4.9	7
				A_p (dB)			1	1.8	3.1	5.2	7.3
				A_e (dB)			0.9	1.5	2.5	3.9	5.9
23 Lustbuehel (AUT)	47.1 N	11.6	H	R_p (mm/h)			(23)	(45)	(70)	(99)	(128)
				A_m (dB)			3.4	5.5	7	10.9	13.9
				A_p (dB)			4.5	7.4	9.8	13	16
				A_e (dB)			4.5	7.6	11.7	17.8	23.9

TABLE V.c. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Japan.
 Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques au Japon.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol		Exceedance time percentages						
					1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %
24 Wakkanai (J)	45.4 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(2.5)		(9.9)		(20.3)		(52.1)
				A_m (dB)			1.7		2.9		8
				A_p (dB)			0.6		1.3		6.5
				A_e (dB)			0.4		1.3		7.3
25 Wakkanai (J)	45.4 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(2.5)		(10)		(28.4)		
				A_m (dB)			2.9		8.4		
				A_p (dB)			4.2		10.5		
				A_e (dB)			4.4		11.6		
26 Sendai (J)	38.2 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(4)		(12)		(38)		
				A_m (dB)			6		18		
				A_p (dB)			3.2		14.5		
				A_e (dB)			1.9		16.1		
27 Yonaguni (J)	24.5 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(5.6)		(37.8)		(82.8)		(117.1)
				A_m (dB)			2.1		14.3		16.7
				A_p (dB)			1.7		15.1		18
				A_e (dB)			2.1		17.6		37.7
28 Yokohama (J)	35.2 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(5)		(17)		(49)		
				A_m (dB)			4		16		
				A_p (dB)			4.1		18.9		
				A_e (dB)			2.8		21.5		
29 Marugame (J)	34.3 N	11.9	V	R_p (mm/h)	(3)		(15)		(53)		
				A_m (dB)			1.3		5.7		
				A_p (dB)			0.8		8.7		
				A_e (dB)			1.2		9.7		
30 Izuohara (J)	34.2 N	92.1	V	R_p (mm/h)	(6.2)		(22)		(47.3)		(76.3)
				A_m (dB)			0.7		4.9		8.6
				A_p (dB)			1.3		7		9.6
				A_e (dB)			1		7.9		17
31 Kashima (J)	35.6 N	11.7	C	R_p (mm/h)	(5)		(16)		(45)		
				A_m (dB)			2		6		
				A_p (dB)			1.3		7.7		
				A_e (dB)			1		8.4		
32 Ashizuri	32.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(7.3)		(31)		(71.1)		(107.7)
				A_m (dB)			1.9		10.2		13.6
				A_p (dB)			2.1		12.5		15.7
				A_e (dB)			1.7		14		30
33 Kesennuma (J)	38.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(3.6)		(12.9)		(33.7)		(71.6)
				A_m (dB)			0.8		5.9		10.6
				A_p (dB)			1		5.9		10
				A_e (dB)			0.8		6.4		13.7
34 Minamidaito (J)	25.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(3.1)		(22.9)		(75.7)		
				A_m (dB)			6		16.7		
				A_p (dB)			1.3		15.7		
				A_e (dB)							

red and estimated rain attenuations on a slant path may lead to very high error percentages (more than 100 %) from relation (18-a). This has no practical sense and we will try to explain further where these deviations originate from.

In order to compare the performances of our method and of the one recommended by CCIR, we have listed in Tables V.a to V.d calculated and experimental rain attenuation data for 44 slant paths divided in the four above mentioned regions, this list being

a non-exhaustive one. Moreover Figures 4 to 5 depict some comparisons of predicted and experimental data versus time percentage.

As it will be seen further, rain fades corresponding to high time percentages, *a fortiori* for $P(\%) > 0.1$ are not closely related to measured rainfall rate. Therefore, inspecting Tables V.a to V.d, the reader can obtain the useful time percentages ranging from 0.001 % to 0.1 %.

From these Tables, as it may be seen, a good accu-

TABLE V.d. - Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in USA.

Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques aux USA.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol		Exceedance time percentages							
					1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	
35 Clarksburg (USA)	39.2 N	11.4	H	R_p (mm/h)	(6)	(11)	(25)	(30)				
				A_m (dB)	1	2.3	4.1	8.5				
				A_p (dB)	1.8	1.9	4	7.5				
				A_e (dB)	2	3.3	5.9	9				
36 Clarksburg (USA)	39.2 N	19	V	R_p (mm/h)	(2)	(4)	(12.5)	(30)	(66.5)			
				A_m (dB)	1	3.8	8.6	16	22.2			
				A_p (dB)	1.3	5	9.4	18.9	34.5			
				A_e (dB)	4.8	9	15.2	25.7	39.7			
37 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(1.8)	(6.8)	(14)	(36)	(70.6)			
				A_m (dB)	2.2	6.3	13					
				A_p (dB)	2	8.3	14.5					
				A_e (dB)	6.8	12.7	21.5					
38 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(3.8)	(9.4)	(19.8)	(38)	(65)			
				A_m (dB)	2.9	7.5	15.5					
				A_p (dB)	3.3	10	17.8					
				A_e (dB)	6	11.3	19					
39 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(2.4)	(6.2)	(14.3)	(33.2)	(57.7)			
				A_m (dB)	3.3	8.1	17.7					
				A_p (dB)	2.3	7.1	13.5					
				A_e (dB)	5.3	10	17					
40 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	52.5	R_p (mm/h)			(9)	(19)	(38)	(61)	(104)	
				A_m (dB)			5	11	14	23	26	
				A_p (dB)			5.2	9	15	20.6	30	
				A_e (dB)			5.1	8.6	13.3	20.3	28.4	
41 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	52.5	R_p (mm/h)	(1)	(4)	(8)	(21)	(43)	(74)	(104)	
				A_m (dB)	3.4	5.1	10	16.9	23.8			
				A_p (dB)	3	4.9	10.3	17.4	25.5			
				A_e (dB)	3.5	5.9	10	15.4	23.5			
42 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	37.2	R_p (mm/h)	(1)	(4)	(8)	(21)	(43)	(74)	(104)	
				A_m (dB)	3.1	5	11	19	26	30		
				A_p (dB)	1	3	5	10.5	17.9	26.2	32.6	
				A_e (dB)	1.9	3.6	6.1	10	15.8	24.1	33.8	
43 Blacksburg (USA)	37.2 N	11.6	C	R_p (mm/h)	(2)	(7)	(19)	(42)	(78)	(102)		
				A_m (dB)	2.2	4.4	8.7	13.9	17.4	20.1		
				A_p (dB)	0.8	2.7	7	13.9	22	23.6		
				A_e (dB)	3.4	5.7	9.7	15	22.9	32		
44 Austin (USA)	30.4 N	11.7	C	R_p (mm/h)	(5)	(16)	(35)	(54)	(85)	(116)		
				A_m (dB)	1.2	3.9	7	11.4	16.5	19.1		
				A_p (dB)	1.3	3.6	7.1	10.2	14.6	18.5		
				A_e (dB)	2	3.5	5.8	9	13.7	19.3		

racy is generally achieved with our method in the four considered regions in comparison with the CCIR method. However high accuracy is obtained in tropical region (with data from Australia) and in Europe.

VI. SOME COMMENTS ON THE ESTIMATED ATTENUATIONS

For very low and very high time percentages, attenuation prediction methods based on rainfall

intensities show a rather important deviation from the measured data on terrestrial or slant paths.

The discrepancies noticed for lower time percentages, are often due to the use of slow response rain-gauges which cannot measure high rainfall intensity peaks leading to higher attenuations.

For higher time percentages, the large deviations observed between predicted and measured attenuations may be due to many different reasons among which the most important in our opinion are :

1) The existence of water vapor in the surrounding air when the rain has just stopped.

2) The antenna performance degradation due to water on the dishes or radome, which absorbs some energy. These losses increase with frequency [14]. Even without any radome, water on the antenna creates some losses. This explains why the carrier level remains below its normal value for a while when it stops raining. Actually it is very difficult to separate the losses due to the wet antenna from those due to the rain. The problem involves many parameters such as hydrological properties of the antenna surface or the aerial geometry.

3) Attenuations observed on a radio link are no longer actually related to rain rates since the lack of sensitivity of some rain-gauges leads to errors on low rain rates.

As far as the CCIR prediction method is concerned, it only involves the 0.01 time percentage rain rate $R_{0.01}$ (mm/h), and thus the attenuation A_p is independent of the rain intensity for all other time percentages. However, this model has some paradoxical aspects that we shall try to explain in the following.

According to the CCIR prediction method, two radio links with the same characteristics, operating in two different geographical areas where the same value of rainfall intensity $R_{0.01}$ (mm/h) is observed, will suffer the same attenuation A_p (dB) for a given time percentage P (%).

Let us examine Table IV which describes the different hydrometeorological zones of the world [15] and choose regions G and H in this Table as an example.

The rain rate value exceeded for 0.01 % of the time in region G is 30 mm/h, and 32 mm/h in region H. The possible lack of precision on data, and the vast extent of regions lead us to consider that the 2 mm/h difference between those two values of the rain rate is so weak that both regions G and H may be assumed to have the same $R_{0.01}$ (mm/h).

For a time percentage of 0.1 %, the corresponding rain rate is 12 mm/h in region G, and 10 mm/h in region H. Then the above assumption may be considered once more.

We can admit without misjudging the assertions of the CCIR model that the two microwave links considered here will actually suffer the same attenua-

tion $A(0.01)$ or $A(0.1)$ for, respectively 0.01 % or 0.1 % of the time.

Returning to Table IV, it may nevertheless be noticed that for 0.001 % of the time, the corresponding exceeded rain rate is 65 mm/h in zone G, and 83 mm/h in zone H. The difference between those two values of rain rate is too large to be neglected and it is not an accepted fact that 83 mm/h on one hand, and 65 mm/h on the other hand, produce the same attenuation for the considered time percentage on two microwave links having the same characteristics.

From this, even though a good prediction accuracy is sometimes obtained with the CCIR method, mainly for higher time percentages, it may be concluded that its use must be limited to time percentages above 0.01 %. Below this threshold, i.e. for lower time percentages, there subsists an accuracy problem to be solved by CCIR. A solution could be to add a new parameter accounting for the climate rainfall structure.

VII. CONCLUSION

The basic aims of our work were first to improve our previous rain attenuation prediction model for terrestrial radio paths ; next to extend it to earth-satellite paths ; and finally to make the latter suited to each geographical region for which a lot of data were available.

The accuracy given by our prediction method for terrestrial paths in Table II allows us to conclude that the first goal has been achieved.

As the latter goals regarding to earth-satellite paths are concerned, Tables Va to Vd show that a reasonable agreement is obtained with the rain induced attenuation prediction model we propose for slant paths, and the latter may be said to work in each of the four regions considered here.

Meanwhile, as far as the USA are concerned, more data are required for a better fitting of the proposed model to the subtropical wet regions on the one hand, and the continental region on the other hand.

Manuscrit reçu le 14 janvier 1987,
accepté le 11 septembre 1987.

REFERENCES

- [1] HOUZE (R. A. Jr.). Structure of atmospheric precipitation system : A global survey. *Radio Sci.*, USA (sept.-oct. 1981), 16, n° 5, pp. 671-689.
- [2] STUTZMAN (W. L.), DISHMAN (W. K.). A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths. *Radio Sci.*, USA (nov.-dec. 1982), 17, pp. 1463-1476.
- [3] *** CCIR Report 564-3, vol. V. XVth Plen. Ass. Dubrovnik 1986.
- [4] MISMÉ (P.), FIMBEL (J.). Détermination théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique. *Ann. Télécomm.*, Fr. (1975), 30, n° 5-6, pp. 149-158.
- [5] MOUPFOUMA (F.). Improvement of a rain attenuation

- prediction method for terrestrial microwave links. *IEEE Trans. AP*, USA (Dec. 1984), 32, pp. 1368-1372.
- [6] CCIR Data bank for line of sight and Earth-space propagation methods. Doc 3/3 (Rev. 1), 1986.
- [7] CCIR Report 338-5, vol. V, XVth Plen. Ass. Dubrovnik (1986).
- [8] OLSEN (R. L.), ROGERS (D. V.), HOGGS (D. B.). The σR^2 relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. AP*, USA (1978), 26, pp. 318-329.
- [9] MOUPPOUMA (F.), SPANJAARD (N.). Rain effects on microwave communications in Equatorial and Tropical regions. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBE-COM)* (Dec. 1-4, 1986), pp. 197-201.
- [10] PRUPPACHER (H. R.), BEARD (K. V.). A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. J. R. Met. Soc.* (April 1970), 96, pp. 247-256.
- [11] *** CCIR Report 721-2, vol. V, XVth Plen. Ass. Dubrovnik (1986).
- [12] MOUPPOUMA (F.). Empirical model of rainfall rates for microwave attenuation prediction in various hydro-meteorological zones. *URSI (Com. F) Open Symposium on Propagation : Remote Sensing and Communications*. Durham University, New. H., USA (July 28th to August 1st 1986), pp. 9.6.1.-9.6.4.
- [13] HOGO (D. C.), CHU (T. S.). The role of rain in satellite communications. *Proceedings of the IEEE* (Sept. 1975), 63, n° 9, pp. 1308-1331.
- [14] *** CCIR Report 563-3, vol. 3, XVth plen. Ass. Dubrovnik (1986).

Rain induced attenuation prediction model for terrestrial and satellite-Earth microwave links

Fidèle MOUNFOUMA *

Abstract

At microwave frequencies, rain is the main cause of degradation of the performances of satellite and terrestrial communications systems, essentially in tropical zones. The design and implementation of such systems involve the knowledge of the propagation parameters which govern link availability and service quality. Thus it seems desirable to develop prediction methods for deriving approximate attenuation statistics for any microwave link. In this paper, a rain induced attenuation model using the concept of equivalent path length is proposed for terrestrial and satellite links. As far as slant paths are concerned, the proposed prediction model uses a parameter, the value of which depends on the geographical zone. These values are given for zones where data are available : Europe, Australia, USA, Japan. The version of the model proposed for Australia (in its tropical part) can be extended to all other tropical zones of the world.

Key words : Electromagnetic wave propagation, Microwave, Attenuation, Rain, Radio-relay link, Earth satellite propagation, Statistical forecasting.

MODÈLE DE PRÉVISION DES AFFAIBLISSEMENTS DUS À LA PLUIE SUR DES LIAISONS HERTZIENNES TERRESTRES ET PAR SATELLITE

Analise

A haute fréquence, la pluie constitue la principale source de dégradation des performances des liaisons hertziennes terrestres et par satellite. La planification de tels systèmes nécessite la connaissance des paramètres de propagation qui régissent la disponibilité des futures liaisons et la qualité de service. Il paraît

donc souhaitable de disposer de méthodes de prévision pour en tirer des statistiques d'affaiblissements pour n'importe quelle liaison. Dans cet article, on propose une nouvelle méthode de prévision des affaiblissements dus à la pluie sur des liaisons hertziennes terrestres et par satellite. Cette méthode est basée sur la notion de trajet radioélectrique équivalent. En ce qui concerne les liaisons par satellite, le modèle utilise un paramètre dont la valeur dépend de la zone géographique considérée. Ces valeurs sont calculées ici pour les zones où les données de pluie sont disponibles : Europe, Australie, USA, Japon. La valeur utilisée pour l'Australie (dans sa partie tropicale) peut l'être aussi pour d'autres régions tropicales du monde.

Mots clés : Propagation onde électromagnétique, Hyperfréquence, Affaiblissement, Pluie, Faisceau hertzien, Propagation Terre satellite, Prévision statistique.

Contents

- I. Introduction.
- II. Rainfall structure.
- III. Rainfall attenuation prediction model.
- IV. Application to terrestrial paths.
- V. Evaluation of rain attenuation along Earth-space paths.
- VI. Some comments on the estimated attenuations.
- VII. Conclusion.
- References (15 ref.).

I. INTRODUCTION

The behaviour of communication systems is closely dependent on local climatology. The design and implementation of such systems involve an

* Conseiller scientifique au CNET (DICT/AIN, en liaison avec LAB/MEP et PAR/RPE), 92131 Issy-les-Moulineaux.

accurate knowledge of propagation parameters which govern link availability and service quality.

Propagation abnormalities adversely affect the performances of communication systems. Those abnormalities are generally classified into clear air effects, and rain induced perturbations. For satellite and terrestrial communication systems operating at frequencies above 10 GHz, rain is the principal cause of signal degradations, especially in tropical regions.

Based on the assertion that the spatial rain distribution along a path is composed of several cells, a rain induced prediction model using the concept of equivalent path length is proposed for satellite and terrestrial links in this paper.

II. RAINFALL STRUCTURE

Two types of rainfall are generally considered [1], namely convective rains and stratiform rains. The first one is characterized by strong showers with high rain rates which are generally observed in small areas for a short period of time. The second one concerns medium and lower intensities. They have a longer duration and may extend over very large areas.

As a general rule, rain consists of cells and is never uniform on a path. To account for this inhomogeneity in the computation of attenuation, a correction coefficient is introduced.

As far as the vertical structure of precipitations is concerned, studies reveal for stratiform rain :

- an upper region constituted by snow and ice,
- a lower region in which liquid water predominates.

Between these two regions is the so called bright-band, corresponding roughly in temperate climates to the 0° C isotherm.

For the convective rain it has been found that [2] rain rates higher than 100 mm/h can be observed above the 0° C isotherm. Calculation of the attenuation for slant paths is then carried out by assuming a uniform rain extending from the ground to an effective height which corresponds to rain height [3] and will be defined later. The height of the rain top varies with rain structure and with latitude. Thus it cannot be the same in temperate zones as in tropical ones.

III. RAINFALL ATTENUATION PREDICTION MODEL

Prediction laws are semi-empirical since they are derived from experimental statistics. However they are not all based on the same concept. Some authors

use the concept of equivalent rainfall intensity [2], others that of effective radio path length [4]. This paper will only deal with the latter concept.

In a previous paper [5] we proposed a prediction model for terrestrial radio links. We adopted the equiprobable relationship between point rainfall intensity and path attenuation based on the effective path length relation which means assuming that the rain structure along the effective path is uniform.

In other words, P being the exceedance probability associated with a point rainfall rate R_p , we determined the equiprobable rain attenuation A_p such that :

$$(1) \quad P(A > A_p) = P(r > R_p).$$

Basic formulation.

L_{eq} being the effective path length, the rain induced attenuation is such that :

$$(2) \quad A_p(\text{dB}) = \Gamma(R_p) L_{eq},$$

where $\Gamma(R_p)$ represents the specific attenuation (or per-kilometer attenuation) and will be defined later.

$l(\text{km})$ being the physical radio path length and r a correction coefficient, the effective path length is given by :

$$(3) \quad L_{eq} = rl.$$

So using (2) and (3), the rain attenuation can be found from :

$$(4) \quad A_p(\text{dB}) = \Gamma(R_p) rl.$$

Thus :

$$(5) \quad r = \frac{A_p(\text{dB})}{\Gamma(R_p) l},$$

Using long term statistics of rain attenuation data in equation (5), the author showed previously [5] that r can be expressed as :

$$(6) \quad r = \frac{1}{1 + 0.03(P/0.01)^{-0.36} f^{1.76}},$$

with :

$$(7) \quad m(f, l) = 1 + 1.4 \cdot 10^{-4} f^{1.76} \log_e(l),$$

where $f(\text{GHz})$ is the radio frequency, and $P(\%)$ the time percentage for which the rain attenuation is predicted. Values of parameter β depend on the path length and are given in the literature [5].

However, we afterwards found it interesting to propose a new formula giving the correction coefficient for the calculation of the effective radio path length such as :

$$(8) \quad C(l, f, R_p, P) = A(l, f, R_p, P) / \Gamma(R_p) l,$$

$$(9) \quad C(l, f, R_p, P) = \frac{u(P)(R_{0.01}/R_p)^{0.01}}{1 + \eta(P/0.01)^{-0.36} f^{1.76}},$$

where $R_{0.01}(\text{mm/h})$ and $R_p(\text{mm/h})$ represent point

TABLE I. — Values of parameter u for terrestrial links.
Valeurs du paramètre u pour des liaisons terrestres.

Characteristics of the radio path	Expressions of $u(P)$ as function of P	
	$P < 0.01 \%$	$P > 0.01 \%$
$l < 5 \text{ km}$ and $f < 25 \text{ GHz}$	$821.4 P^0 - 34.6 P + 1.3$	$0.93 e^{0.14P}$
$l > 50 \text{ km}$ with any $f(\text{GHz})$	$0.74 P^{-0.07}$	$1.48 P^{0.106}$
All other cases	$0.71 P^{-0.07}$	$0.89 e^{0.12P}$

rainfall intensities observed on the radio path during 0.01 % and $P(\%)$ of the time, respectively, P being the same time percentage for which the attenuation exceedance is to be calculated.

$m(f, l)$ is given by relation (7), and it should be recalled that the frequency dependence of C is due both to the inhomogeneity of rain along the path and to the non-linearity of the relationship between specific attenuation and rain rate [5].

Parameters u , ν and η were determined using attenuation data from the CCIR data base [6]. While u depends on the type of path : terrestrial or slant path, ν and η are given for any path, by :

$$(10) \quad \nu(l) = 0.38 l^{-0.23}.$$

$$(11) \quad \eta = \begin{cases} 0 & \text{If } l < 5 \text{ km and } f < 25 \text{ GHz} \\ 0.03 & \text{In all other cases} \end{cases}$$

Relation (11) is easily explainable, since a short link ($l < 5 \text{ km}$) may be contained almost entirely in one rain cell. Moreover, according to the analysis we carried out, for frequencies lower than 25 GHz, the rain effects observed on a radio link with a path length smaller than 5 km, are similar to those due to a uniform rainfall on the whole path considered.

IV. APPLICATION TO TERRESTRIAL PATHS

IV.1. Determination of parameter u on terrestrial links.

The data used here are those given by CCIR data base [6]. Moreover, to agree with the CCIR Testing group 1 of Study group 5 [7], we have increased by 8 % the rainfall intensity values from Leidschendam on the one hand, and have not used data from Rio de Janeiro on the other hand.

Analysing all the data used here, we noticed that one has to distinguish three cases.

Parameter u which depends on the radio path

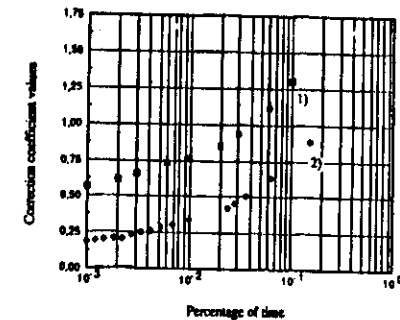


FIG. 1. — Behaviour of the correction coefficient for terrestrial paths.

- 1) Mendlesham - UK (7.4 km, 19.4 GHz - V).
2) Paris - France (58 km, 11.7 GHz - H).
Comportement du coefficient de correction des trajets terrestres.

characteristics is expressed for each of those three cases as (Table I).

IV.2. Behaviour of the correction coefficient versus rain rate.

Figure 1 points out the variations of the correction coefficient as a function of time percentage for a long radio path link on the one hand, and for a short one on the other hand. In both cases it can be noticed that the correction coefficient increases with time percentage, which in other words means that the lower the rain rate, the higher the correction coefficient. As far as the long radio path corresponding to a French radio link near Paris (58 km, 11.7 km) is concerned, the correction coefficient has values smaller than 1 whatever the percentage of time, while the short radio path which concerns a British radio link near Mendlesham (19.4 GHz, 7.4 km) shows values greater than 1 for high time percentages. Thus we cannot adopt the notion of « reduction factor »

for relation (9) but rather that of « correction factor or correction coefficient ».

As a matter of course, it results from the foregoing that the effective radio path length increases with decreasing rain rate.

IV.3. Rainfall attenuation calculation for terrestrial microwave links.

Specific attenuation $\Gamma(R_p)$ is related to the point rainfall rate R_p (mm/h) through :

$$(13) \quad \Gamma(R_p) = k R_p^\alpha \quad (\text{dB/km}),$$

where k and α are parameters depending on operating frequency, rain temperature and raindrop shape [8]. In general, raindrops are assumed to be spheres, oblate spheroids or shaped according to the Pruppacher and Pitter model [10]. For spherical raindrops, the attenuation is independent of wave polarization, while for other shapes, it depends on the polarization of the transmitted field, and on the canting angle of the raindrops.

IV.3.1. Proposed method.

Substituting for $C(l, f, R_p, P)$ in (4) and using equation (13), the attenuation suffered by a terrestrial radio link is then given by :

$$(14) \quad A_r(\text{dB}) = k R_p^\alpha \frac{u(P) (R_{0.01}/R_p)^{0.38L_0-0.11}}{1 + \eta(P/0.01)^{-0.38} L_0^{0.11} l},$$

with η and u given by equations (11), (12) and Table I.

IV.3.2. CCIR method.

Following the CCIR [12], the attenuation due to rain on a terrestrial link is given by :

$$(15) \quad A_r(\text{dB}) = k R_{0.01}^\alpha l b P^{-a},$$

with :

$$(16) \quad b = 0.12 \text{ and } a = 0.546 + 0.043 \log_{10}(P),$$

$$(17) \quad r_s = \frac{1}{1 + 0.045 l},$$

r_s is the so called reduction coefficient since, it is always lower than 1. l represents the physical path length, $R_{0.01}$ (mm/h) the rainfall intensity exceeded for 0.01 % of the time, and P (%) the time percentage for which the attenuation is to be calculated.

IV.4. Comparison of the performances of the two prediction methods.

In Figures 2 to 3 the attenuations derived from the above two models are compared to experimental data gathered in Darmstadt (FRG) and Paris (France).

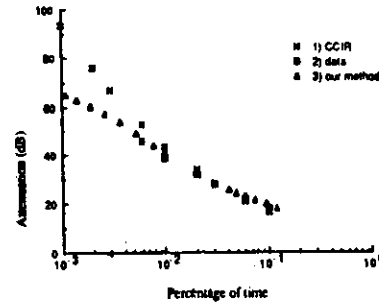


FIG. 2. — Rain attenuation on terrestrial path Darmstadt - rno (29 GHz, 20 km, H-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison terrestre.

× 1) CCIR.

• 2) Données expérimentales.

Δ 3) Notre méthode.

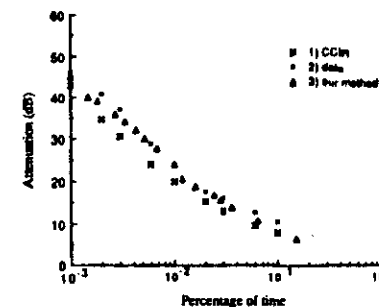


FIG. 3. — Rain attenuation on terrestrial path Paris - France (11.7 GHz, 58 km, H-Pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison terrestre.

× 1) CCIR.

• 2) Données expérimentales.

Δ 3) Notre méthode.

A fairly good agreement is obtained with our model both for short and long radio links. Moreover, a testing method proposed by CCIR [11] has been used for exceedance time percentages ranging from 0.001 % to 0.1 %. The percentage error ϵ_i has been evaluated for the 38 radio links we investigated such that :

$$(18-a) \quad \epsilon_i = \frac{A_p - A_m}{A_m} 100 \quad (i = 1 \text{ to } 38),$$

where A_p (dB) represents the predicted attenuation, since A_m (dB) is the measured one.

The measurement inaccuracy has been partly taken into account by putting $\epsilon_i = 0$ if :

$$(18-b) \quad |A_p - A_m| < 1 \quad (\text{dB}),$$

TABLE II. — Percentage errors.
Pourcentages d'erreurs.

Percentages of time		0.001 %	0.002 %	0.003 %	0.006 %	0.01 %	0.02 %	0.03 %	0.06 %	0.1 %
μ_e	Proposed model	2.3	2.9	2.9	2.2	0.8	0.3	2.6	2.1	2.6
	CCIR model	— 7.1	— 7.1	— 7.6	— 5.5	— 5.6	— 4.1	— 4.7	— 6	— 7.6
σ_e	Proposed model	13.9	10.5	10.8	10.7	8.4	8.2	9.4	13.9	20.5
	CCIR model	12.6	13.3	12.7	12.3	10.8	10.5	11.5	13.9	15.7
D_e	Proposed model	14	10.9	11.2	10.9	8.4	8.2	9.8	14.1	20.7
	CCIR model	14.5	15	14.8	13.5	12.2	11.3	12.4	15.1	19

μ_e being the mean and σ_e the standard deviation of the error distribution defined as :

$$(19-a) \quad \sigma_e = \sqrt{\frac{1}{38} \sum_{i=1}^{38} \epsilon_i^2 - \left(\frac{1}{38} \sum_{i=1}^{38} \epsilon_i \right)^2},$$

the root mean square (r.m.s.) value D_e of the errors :

$$(19-b) \quad D_e = \sqrt{\mu_e^2 + \sigma_e^2}.$$

constitutes the most convenient parameter for a comparison between the prediction methods according to CCIR [11]. Values of μ_e , σ_e , and D_e corresponding to different time percentages are listed in Table II for our prediction model and the CCIR one. Its inspection shows that generally our proposed model gives better results than the CCIR model.

V. EVALUATION OF RAIN ATTENUATION ALONG EARTH-SPACE PATH

As aforesaid, the prediction of rain attenuation on earth-space links requires the knowledge of the elevation angle of the slant path, the height of the earth station above the sea level and its latitude. The ground station height is important since the length of the propagation path crossing the rainy zone decreases with increasing altitude. This leads to lower rain attenuation when the ground station is installed on the top of a mountain, than when it is at the mountain base.

As far as the rain height is concerned, though hit is known in temperate zones, due to the lack of data, no mathematical law governing it for tropical zones is known now [9].

Rain temperature constitutes also an important parameter. While it is usually assumed that for terrestrial paths rain temperature is about 20° C, such an hypothesis no longer holds for slant paths, since temperature decreases with height. 0° C is

supposed to be a more suitable value for the rain temperature on Earth-space paths whatever the climate [8].

V.1. Determination of the slant path length through rain.

As recommended by CCIR study group 5 [3], the vertical rain height H_R (km) expressed in terms of latitude φ (degrees) is :

$$(20) \quad H_R = \begin{cases} 4 & 0 < \varphi < 36^\circ, \\ 4 - 0.075 (\varphi - 36) & \varphi \geq 36^\circ. \end{cases}$$

Thus the slant path length L_s is obtained from :

$$(21) \quad L_s = \begin{cases} \frac{H_R - H_0}{\sin \theta} & \text{for } \theta < 5^\circ, \\ \frac{H_R - H_0}{\left((\sin^2 \theta) + 2 \frac{H_R - H_0}{8500} \right)^{1/2}} + \sin \theta & \text{for } \theta \geq 5^\circ, \end{cases}$$

where θ is the path elevation angle, and H_0 (km) is the station height above mean sea level.

V.2. Application of the concept of correction factor to slant paths.

Attenuation on Earth-space paths will be estimated here by an extension of the rain attenuation prediction method for terrestrial paths given by relation (14). The terrestrial physical path length l (km) is now replaced by the slant path length L_s . Thus the predicted rain attenuation on a satellite link can be obtained from :

$$(22) \quad A_r(\text{dB}) = k R_p^\alpha \frac{u(P) (R_{0.01}/R_p)^{0.38L_0-0.11}}{1 + \eta (P/0.01)^{-0.38} L_s^{0.11} L_0},$$

with :

$$(23) \quad m(f, L_s) = 1 + 1.4 \cdot 10^{-4} f^{1.76} \log_{10}(L_s).$$

The parameter η is given by relations (11) and (12) as a function of path length L_e and frequency f (GHz).

V.2.1. Determination of parameter u for slant paths.

Since for terrestrial paths the horizontal structure of rainfall mainly influences the rain attenuation calculations, for slant paths the vertical structure and the horizontal one act together. So this will lead for Earth satellite paths to rather different values of parameter $u(P)$, in relation to terrestrial path.

Rain induced attenuation data for slant paths in the CCIR data base [6] or in the literature, are well distributed among the countries for which they are available : Australia, Europe, Japan, USA ; this is not the case for terrestrial microwave links for which most of the available data belong to Europe [6].

Australia, Europe, Japan, USA are not characterized by the same types of precipitations [12] about which we know that they influence the rainfall structure. So, instead of proposing, in the case of satellite paths, a global method for the whole world, we favour rather a zonal rain attenuation prediction method fitted to the above respective four regions ; which we could not do for terrestrial paths, due to the small size of their data base (38 links only).

This zonal prediction method is governed by parameter $u(p)$, the expressions of which are listed in Table III. These expressions are derived for each one of the four zones from long term measurements [6] in the frequency band ranging from 10 to 30 GHz.

Using the CCIR model, the path reduction factor for 0.01 % of the time is given by :

$$(24) \quad r_s = \frac{1}{1 + 0.045 L_s \cos \theta}$$

The path attenuation exceeded for the useful time percentage P is calculated from:

$$(25) \quad A_P(\text{dB}) = k R_{0.01}^a r_s L_s^b P^{-c},$$

with parameters a and b given by relation (16).

V.2.2. Prediction accuracy for Earth-space paths.

Before carrying on with this paragraph, it seems necessary to us to warn the reader about the following.

TABLE III. — Evaluation of parameter u for slant paths.

Evaluation du paramètre u pour des liaisons obliques.

Regions	Parameter u for slant paths as a function of time percentage $P(\%)$	
	$L_e \geq 5 \text{ km}$	$L_e < 5 \text{ km}$
Australia	$u = 0.24 P^{-0.11}$	$u = 0.47 P^{0.06}$
Europe	$u = 1.11 P^{-0.554}$	$u = -38 P^2 + 7 P + 0.65$
Japan	$u = 1.54 P^2 - 1.3 P + 0.9$	$u = 1.73 P^{0.11}$
USA	$u = -0.3 P^2 - 0.007 P + 0.82$	$u = 1.3 P^{0.01}$

Rain induced attenuations on earth satellite paths are generally lower than on terrestrial links. So, for high time percentages, deviations between the measu-

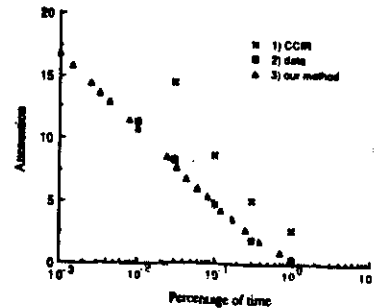


FIG. 4. — Rain attenuation on slant path Darwin - Australia (11.1 GHz, 60 deg. elev., V-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison oblique.

- × 1) CCIR.
- 2) Données expérimentales.
- Δ 3) Notre méthode.

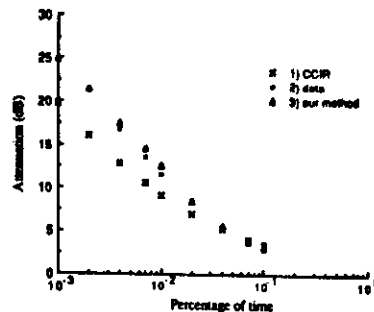


FIG. 5. — Rain attenuation on slant path Lario - Italy (11.6 GHz, 32 deg. elev., H-pol).

Affaiblissement dû à la pluie sur une liaison oblique.

- × 1) CCIR.
- 2) Données expérimentales.
- Δ 3) Notre méthode.

TABLE IV. — CCIR rain climatic zones [15]. Rainfall intensity exceeded (mm/h).
Zones climatiques du CCIR [15]. Intensités de pluie dépassées (mm/h).

Percentage of time	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	P
1.0	—	1	—	3	1	2	—	—	—	2	—	4	5	12	—
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34	—
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	—
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	—
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	—
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	—
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	—

TABLE V.a. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Australia.
 A_m = Measured attenuations ; A_p = Predicted attenuations with our method.
 A_c = Predicted attenuations with CCIR method.

Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques en Australie.
 A_m = Affaiblissements mesurés ; A_p = Affaiblissements calculés avec notre méthode.
 A_c = Affaiblissements calculés avec la méthode du CCIR.

	Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol	Exceedance time percentages							
					1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	
1	Darwin (AUS)	12.4 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(7) 0.8 0.72 3.4	(27) 2.9 2.59 6.4	(71) 5.8 6.5 10.8	(115) 9.2 10.2 18.3	(156) 12.3 13.4 28.2	(197)	(236)
2	Darwin (AUS)	12.4 S	14.2	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(7) 1.4 1.3 5	(27) 4.3 4.4 9.4	(71) 9.7 10.2 16	(115)	(156)	(197)	(236)
3	Darwin (AUS)	12.4 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(5) 0.4 0.5 2.7	(24) 2 2.2 5.1	(49) 4.8 4.3 8.6	(86) 8.3 7.3 14.6	(130) 11.4 10.7 22.5	(178)	(215)
4	Darwin (AUS)	12.4 S	14.2	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(5) 3.4 3.8 7.6	(24) 7.6 7.0 12.9	(49) 7.6 7.0 12.9	(86)	(130)	(178)	(215)
5	Innisfail (AUS)	17.6 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(21) 1.6 1.6 4.2	(41) 3.5 3.5 7.9	(70) 6.3 6.6 13.4	(107) 10.2 11.2 22.7	(142)	(180)	(203)
6	Innisfail (AUS)	17.6 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(25) 1.6 1.4 3.6	(57) 2.5 3.7 6.8	(89) 6.4 6.4 11.5	(121) 9.8 9.8 19.4	(149)	(180)	(203)
7	Clayton (AUS)	37.9 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)			(16) 1 0.9 3.1	(36) 2.1 2.2 5.3	(53) 4.3 3.6 8.1	(82) 7.7 5.9 12.4	(113) 10.3 8.5 17.4
8	Clayton (AUS)	37.9 S	14.2	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(7) 0.9 0.7 3	(16.5) 1.7 1.6 5	(35.5) 3.4 3.6 8.5	(54) 6.4 5.8 13	(82.5) 10.7 9.2 20		(111.5)
9	Clayton (AUS)	37.9 S	11.1	V	R_p (mm/h) A_m (dB) A_p (dB) A_c (dB)	(8.5) 1 0.9 3.3	(17) 1.8 2 5.6	(32.5) 3.2 4.3 9.5	(52) 5.2 7.1 14.7	(79) 9.3 11 22.4		(102) 10.8 13.7 31.4

TABLE V.b. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Europe.
Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques en Europe.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol	Exceedance time percentages							
				1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻⁴ %
10 Leeheim (D)	49.9 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(1.4)	(3.3)	(6.7)	(15)	(32.9)	(50.7)	(68.6)
				A_m (dB)			1.2	2.6	6	10.3	14.8
				A_p (dB)			1.5	3.3	6.9	10.2	12.9
				A_e (dB)			2	3.3	5.2	7.9	11
11 Leeheim (D)	49.9 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(1.8)	(3.9)	(7.4)	(17.6)	(33)	(66.1)	(83)
				A_m (dB)			1.4	3.1	7.8	14.7	21.1
				A_p (dB)			1.7	3.9	7	13.2	15.5
				A_e (dB)			2	3.3	5.2	7.9	11.1
12 Gornetz (F)	48.7 N	11.6	H	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	
				A_m (dB)			1.3	2.2	3.3	4.7	9.3
				A_p (dB)			0.9	1.4	2.7	4.8	7.6
				A_e (dB)			1.4	2.4	4	6.2	9.4
13 Gornetz (F)	48.7 N	11.8	C	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	
				A_m (dB)			1.6	2.4	3.8	5.4	7.9
				A_p (dB)			0.8	1.2	2.3	4	6.3
				A_e (dB)			0.7	1.1	1.9	3	4.5
14 Gornetz (F)	48.7 N	14.5	C	R_p (mm/h)	(4)	(6)	(11.5)	(21)	(35)	(54)	
				A_m (dB)			2.8	3.7	5.2	7	10.9
				A_p (dB)			1.4	2	3.6	6.2	9.5
				A_e (dB)			1	1.8	3	4.6	7
15 Spino d'Adda (I)	45.4 N	11.6	V	R_p (mm/h)	(5)	(9.9)	(27)	(55)	(92.5)	(126)	
				A_m (dB)			2.6	6.5	14	22.7	
				A_p (dB)			2.5	6.8	13.3	21.1	
				A_e (dB)			4	6.7	10.3	15.8	
16 Lario (I)	46.2 N	11.6	C	R_p (mm/h)	3.2	(7)	(12.5)	(27.8)	(52)	(84)	(117)
				A_m (dB)			2.9	6.5	11.5		
				A_p (dB)			3.2	6.8	12.4		
				A_e (dB)			3.5	6	9.2		
17 Stockholm (S)	59.3 N	11.6	H	R_p (mm/h)	(3)	(10.1)	(22)	(35.5)	(46)		
				A_m (dB)			0.7	1.8	3.9	6.6	9.3
				A_p (dB)			1.1	2.2	4.7	7.2	8.7
				A_e (dB)			1.3	2.2	3.4	5.2	7.3
18 Albertslund	55.7 N	11.8	C	R_p (mm/h)			(9)	(16)	(33)	(53)	
				A_m (dB)			1.4	2.3	4.5	7.8	
				A_p (dB)			1.8	3	5.9	8.9	
				A_e (dB)			1.5	2.2	3.4	4.8	
19 Martlesham (G)	52.1 N	11.6	H	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)		
				A_m (dB)			3.8	5.7	8		
				A_p (dB)			3.3	5.9	8.2		
				A_e (dB)			2.4	3.7	5.2		
20 Martlesham (G)	52.1 N	14.5	C	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)		
				A_m (dB)			5.5	8.1	11.6		
				A_p (dB)			5.1	8.7	11.9		
				A_e (dB)			3.8	5.8	8.1		
21 Martlesham (G)	52.1 N	11.8	C	R_p (mm/h)			(17)	(32)	(48)		
				A_m (dB)			3.6	5.4	7.9		
				A_p (dB)			3.2	5.8	8		
				A_e (dB)			2.4	3.7	5.1		
22 Fucino (I)	42.0 N	11.6	C	R_p (mm/h)	(5)	(8.5)	(15)	(26)	(46)	(69)	
				A_m (dB)			1.2	1.9	3	4.9	9
				A_p (dB)			1	1.8	3.1	5.2	8.8
				A_e (dB)			0.9	1.5	2.5	3.9	5.9
23 Lustbuehl (AUT)	47.1 N	11.6	H	R_p (mm/h)			(23)	(45)	(70)	(99)	(128)
				A_m (dB)			3.4	5.5	7	15.9	
				A_p (dB)			4.5	7.4	9.8	13	
				A_e (dB)			4.5	7.6	11.7	17.8	

TABLE V.c. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in Japan.
Comparaison des affaiblissements calculés et mesurés sur des liaisons obliques au Japon.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol	Exceedance time percentages							
				1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %	10 ⁻⁴ %
24 Wakkanai (J)	45.4 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(2.5)		(9.9)	(20.3)		(52.1)	
				A_m (dB)	< 1		1.7	2.9		8	
				A_p (dB)	0.6		1.5	3.1		6.5	
				A_e (dB)	0.4		1.3	3.4		7.1	
25 Wakkanai (J)	45.4 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(2.5)		(10)	(28.4)			
				A_m (dB)			2.9	8.4			
				A_p (dB)			4.2	10.5			
				A_e (dB)			4.4	11.6			
26 Sendai (J)	38.2 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(4)		(12)	(38)			
				A_m (dB)	3		6	18			
				A_p (dB)	3.2		5.3	14.5			
				A_e (dB)	1.9		6.2	16.1			
27 Yonaguni (J)	24.5 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(3.6)		(37.8)	(82.8)		(117.1)	
				A_m (dB)	2.1		8.1	14.3		16.7	
				A_p (dB)	1.7		6.9	15.1		18	
				A_e (dB)	2.1		6.7	17.6		37.7	
28 Yokohama (J)	35.2 N	19.5	C	R_p (mm/h)	(3)		(17)	(49)			
				A_m (dB)	4		8	16			
				A_p (dB)	4.1		7.5	18.9			
				A_e (dB)	2.8		8.2	21.5			
29 Marugame (J)	34.3 N	11.9	V	R_p (mm/h)	(3)		(15)	(53)			
				A_m (dB)	1.3		3	5.7			
				A_p (dB)	0.8		2.5	8.7			
				A_e (dB)	1.2		3.7	9.7			
30 Izuohara (J)	34.2 N	92.1	V	R_p (mm/h)	(6.2)		(22)	(47.3)		(76.3)	
				A_m (dB)	0.7		2.1	4.9		8.6	
				A_p (dB)	1.5		3.3	7		9.6	
				A_e (dB)	1		3	7.9		17	
31 Kashima (J)	35.6 N	11.7	C	R_p (mm/h)	(5)		(16)	(45)			
				A_m (dB)	1		2	6			
				A_p (dB)	1.3		2.7	7.7			
				A_e (dB)	1		3.2	8.4			
32 Ashiguri	32.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(7.3)		(31)	(71.1)		(107.7)	
				A_m (dB)	1.9		5	10.2		13.6	
				A_p (dB)	2.1		5.5	12.5		15.7	
				A_e (dB)	1.7		5.4	14		30	
33 Kasennuma (J)	38.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(3.6)		(12.9)	(33.7)		(71.6)	
				A_m (dB)	0.8		2.4	5.9		10.6	
				A_p (dB)	1		2.3	5.9		10	
				A_e (dB)	0.8		2.5	6.4		13.7	
34 Minamidaito (J)	23.8 N	12.1	V	R_p (mm/h)	(3.1)		(22.9)	(75.7)			
				A_m (dB)	1.4		6	16.7			
				A_p (dB)	1.3		6.7	15.7			
				A_e (dB)							

red and estimated rain attenuations on a slant path may lead to very high error percentages (more than 100 %) from relation (18-a). This has no practical sense and we will try to explain further where these deviations originate from.

In order to compare the performances of our method and of the one recommended by CCIR, we have listed in Tables V.a to V.d calculated and experimental rain attenuation data for 44 slant paths divided in the four above mentioned regions, this list being

a non-exhaustive one. Moreover Figures 4 to 5 depict some comparisons of predicted and experimental data versus time percentage.

As it will be seen further, rain fades corresponding to high time percentages, a fortiori for $P(\%) > 0.1$ are not closely related to measured rainfall rate. Therefore, inspecting Tables V.a to V.d, the reader can obtain the useful time percentages ranging from 0.001 % to 0.1 %.

From these Tables, as it may be seen, a good accu-

TABLE V.d. — Comparisons of predicted and measured rain attenuations on slant paths in USA.
 Comparaison de l'affaiblissement calculé et mesuré sur des liaisons obliques aux USA.

Localities	Lat (deg)	Freq (GHz)	Pol		Exceedance time percentages						
					1 %	3.10 ⁻¹ %	10 ⁻¹ %	3.10 ⁻² %	10 ⁻² %	3.10 ⁻³ %	10 ⁻³ %
35 Clarksburg (USA)	39.2 N	11.6	H	R_p (mm/h)	(6)	(11)	(25)	(50)			
				A_m (dB)	1	2.3	4.1	8.5			
				A_p (dB)	1.8	1.9	4	7.5			
				A_d (dB)	2	3.5	5.9	9			
36 Clarksburg (USA)	39.2 N	19	V	R_p (mm/h)	(2)	(6)	(12.5)	(30)	(66.5)		
				A_m (dB)	1	3.8	8.6	16	22.2		
				A_p (dB)	1.3	5	9.4	18.9	34.5		
				A_d (dB)	4.8	9	15.2	25.7	39.7		
37 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(1.8)	(6.8)	(14)	(36)	(70.6)		
				A_m (dB)	2.2	6.3	13				
				A_p (dB)	2	8.3	14.5				
				A_d (dB)	6.8	12.7	21.5				
38 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(3.8)	(9.4)	(19.8)	(38)	(65)		
				A_m (dB)	2.9	7.5	15.3				
				A_p (dB)	3.3	10	17.8				
				A_d (dB)	6	11.3	19				
39 Wallops Island (USA)	37.8 N	28.6	V	R_p (mm/h)	(2.4)	(6.2)	(14.3)	(33.2)	(57.7)		
				A_m (dB)	3.3	8.1	17.7				
				A_p (dB)	2.3	7.1	13.5				
				A_d (dB)	5.3	10	17				
40 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	52.5	R_p (mm/h)			(9)	(19)	(38)	(61)	(104)
				A_m (dB)			5	11	14	23	26
				A_p (dB)			5.2	9	13	20.6	30
				A_d (dB)			5.1	8.6	13.3	20.3	28.4
41 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	52.5	R_p (mm/h)	(1)	(4)	(8)	(21)	(43)	(74)	(104)
				A_m (dB)		3.4	5.1	10	16.9	23.8	
				A_p (dB)		3	4.9	10.3	17.4	25.5	
				A_d (dB)		3.5	5.9	10	15.4	23.5	
42 Blacksburg (USA)	37.2 N	19	37.2	R_p (mm/h)	(1)	(4)	(8)	(21)	(43)	(74)	(104)
				A_m (dB)	3.1	5	6	11	19	26	30
				A_p (dB)	1	3	5	10.5	17.9	26.2	32.6
				A_d (dB)	1.9	3.6	6.1	10	15.8	24.1	33.8
43 Blacksburg (USA)	37.2 N	11.6	C	R_p (mm/h)	(2)	(7)	(19)	(42)	(78)	(102)	
				A_m (dB)	2.2	4.4	8.7	13.9	17.4	20.1	
				A_p (dB)	0.8	2.7	7	13.9	22	23.6	
				A_d (dB)	3.4	5.7	9.7	15	22.9	32	
44 Austin (USA)	30.4 N	11.7	C	R_p (mm/h)	(5)	(16)	(35)	(54)	(85)	(116)	
				A_m (dB)	1.2	2.9	7	11.4	16.5	19.1	
				A_p (dB)	1.3	3.6	7.1	10.2	14.6	18.5	
				A_d (dB)	2	5.5	5.8	9	13.7	19.3	

racy is generally achieved with our method in the four considered regions in comparison with the CCIR method. However high accuracy is obtained in tropical region (with data from Australia) and in Europe.

VI. SOME COMMENTS ON THE ESTIMATED ATTENUATIONS

For very low and very high time percentages, attenuation prediction methods based on rainfall

intensities show a rather important deviation from the measured data on terrestrial or slant paths.

The discrepancies noticed for lower time percentages, are often due to the use of slow response rain-gauges which cannot measure high rainfall intensity peaks leading to higher attenuations.

For higher time percentages, the large deviations observed between predicted and measured attenuations may be due to many different reasons among which the most important in our opinion are :

1) The existence of water vapor in the surrounding air when the rain has just stopped.

2) The antenna performance degradation due to water on the dishes or radome, which absorbs some energy. These losses increase with frequency [14]. Even without any radome, water on the antenna creates some losses. This explains why the carrier level remains below its normal value for a while when it stops raining. Actually it is very difficult to separate the losses due to the wet antenna from those due to the rain. The problem involves many parameters such as hydrological properties of the antenna surface or the aerial geometry.

3) Attenuations observed on a radio link are no longer actually related to rain rates since the lack of sensitivity of some rain-gauges leads to errors on low rain rates.

As far as the CCIR prediction method is concerned, it only involves the 0.01 time percentage rain rate $R_{0.01}$ (mm/h), and thus the attenuation A_p is independent of the rain intensity for all other time percentages. However, this model has some paradoxical aspects that we shall try to explain in the following.

According to the CCIR prediction method, two radio links with the same characteristics, operating in two different geographical areas where the same value of rainfall intensity $R_{0.01}$ (mm/h) is observed, will suffer the same attenuation A_p (dB) for a given time percentage P (%).

Let us examine Table IV which describes the different hydrometeorological zones of the world [15] and choose regions G and H in this Table as an example.

The rain rate value exceeded for 0.01 % of the time in region G is 30 mm/h, and 32 mm/h in region H. The possible lack of precision on data, and the vast extent of regions lead us to consider that the 2 mm/h difference between those two values of the rain rate is so weak that both regions G and H may be assumed to have the same $R_{0.01}$ (mm/h).

For a time percentage of 0.1 %, the corresponding rain rate is 12 mm/h in region G, and 10 mm/h in region H. Then the above assumption may be considered once more.

We can admit without misjudging the assertions of the CCIR model that the two microwave links considered here will actually suffer the same attenua-

tion $A(0.01)$ or $A(0.1)$ for respectively 0.01 % or 0.1 % of the time.

Returning to Table IV, it may nevertheless be noticed that for 0.001 % of the time, the corresponding exceeded rain rate is 65 mm/h in zone G, and 83 mm/h in zone H. The difference between those two values of rain rate is too large to be neglected and it is not an accepted fact that 83 mm/h on one hand, and 65 mm/h on the other hand, produce the same attenuation for the considered time percentage on two microwave links having the same characteristics.

From this, even though a good prediction accuracy is sometimes obtained with the CCIR method, mainly for higher time percentages, it may be concluded that its use must be limited to time percentages above 0.01 %. Below this threshold, i.e. for lower time percentages, there subsists an accuracy problem to be solved by CCIR. A solution could be to add a new parameter accounting for the climate rainfall structure.

VII. CONCLUSION

The basic aims of our work were first to improve our previous rain attenuation prediction model for terrestrial radio paths ; next to extend it to earth-satellite paths ; and finally to make the latter suited to each geographical region for which a lot of data were available.

The accuracy given by our prediction method for terrestrial paths in Table II allows us to conclude that the first goal has been achieved.

As the latter goals regarding to earth-satellite paths are concerned, Tables Va to Vd show that a reasonable agreement is obtained with the rain induced attenuation prediction model we propose for slant paths, and the latter may be said to work in each of the four regions considered here.

Meanwhile, as far as the USA are concerned, more data are required for a better fitting of the proposed model to the subtropical wet regions on the one hand, and the continental region on the other hand.

Manuscrit reçu le 14 janvier 1987,
 accepté le 11 septembre 1987.

REFERENCES

- [1] HOUZE (R. A. Jr.). Structure of atmospheric precipitation system : A global survey. *Radio Sci.*, USA (sept.-oct. 1981), 16, n° 5, pp. 671-689.
- [2] STUTZMAN (W. L.), DESHMAN (W. K.). A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths. *Radio Sci.*, USA (nov.-dec. 1982), 17, pp. 1465-1476.
- [3] *** CCIR Report 564-3, vol. V. XVth Plén. Ass. Dubrovnik 1986.
- [4] MINNA (P.), FOMEL (J.). Détermination théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique. *Ann. Télécom.*, Fr. (1975), 30, n° 5-6, pp. 149-158.
- [5] MOUPPOUMA (F.). Improvement of a rain attenuation

- prediction method for terrestrial microwave links. *IEEE Trans. AP*, USA (Dec. 1984), 32, pp. 1368-1372.
- [6] CCIR Data bank for line of sight and Earth-space propagation methods. Doc 5/3 (Rev. 1), 1986.
- [7] CCIR Report 338-5, vol. V, XVIIth Plen. Ass. Dubrovnik (1986).
- [8] OLSEN (R. L.), ROGERS (D. V.), HOGAN (D. B.). The aR^b relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. AP*, USA (1978), 26, pp. 318-329.
- [9] MOUPPOUMA (F.), SPANJAARD (N.). Rain effects on microwave communications in Equatorial and Tropical regions. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBE-COM)* (Doc. 1-4, 1986), pp. 197-201.
- [10] PRUPPACHER (H. R.), BEARD (K. V.). A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. J. R. Met. Soc.* (April 1970), 96, pp. 247-256.
- [11] *** ccm Report 721-2, vol. V, XVIIth Plen. Ass. Dubrovnik (1986).
- [12] MOUPPOUMA (F.). Empirical model of rainfall rates for microwave attenuation prediction in various hydro-meteorological zones. *URSI (Com. F) Open Symposium on Propagation : Remote Sensing and Communications*. Durham University, New. H., USA (July 28th to August 1st 1986), pp. 9.6.1.-9.6.4.
- [13] HOGG (D. C.), CHU (T. S.). The role of rain in satellite communications. *Proceedings of the IEEE* (Sept. 1975), 63, n° 9, pp. 1308-1311.
- [14] *** ccm Report 563-3, vol. 8, XVIIth plen. Ass. Dubrovnik (1986).